



MÁSTER EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA
FACULTAD DE GEOGRAFÍA E HISTORIA

APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DE FOTO-RECONSTRUCCIÓN 3D PARA MONITORIZAR LA EROSIÓN DE UN ESCARPE NATURAL EN UNA LADERA ACARCAVADA DEL VALLE DEL RÍO DURATÓN (SEGOVIA)



TRABAJO DE FIN DE MÁSTER 2016

AUTORA: LOURDES RODRÍGUEZ MORENO

Tutor: Luis Miguel Tanarro García
Facultad de Geografía e Historia
Universidad Complutense de Madrid





AGRADECIMIENTOS

Gracias a todas aquellas personas que directa o indirectamente han aportado alguno de sus conocimientos para complementar un apartado de este Trabajo de Fin de Máster, especialmente profesores y compañeros del Máster de Tecnologías de la Información Geográfica, compañeros de trabajo y amigos Geólogos.

Gracias a mi tutor, Luis Miguel Tanarro García por su paciencia y dedicación prestada en todo momento, por su gran labor como tutor y por su esfuerzo para que este proyecto saliese a delante.

Gracias a Iker Martínez Abad por leer y revisar cada una de las palabras que aparecen en este proyecto, por aportar sus conocimientos de geología, por sus grandes consejos y su paciencia infinita.

Gracias a mis padres y mis hermanas por apoyarme y darme todo el cariño necesario para afrontar este último reto.

Y gracias a ti, Postigo por acompañarme, animarme y entenderme cuando los resultados no son los esperados.



RESUMEN

En los últimos años los avances en la fotogrametría han permitido el perfeccionamiento de la técnica de Foto-Reconstrucción 3D (FR-3D) y el desarrollo de programas informáticos que nos permiten la obtención de modelos tridimensionales del terreno de alta resolución.

En este trabajo se presenta el potencial de la técnica de Foto-Reconstrucción 3D para analizar los procesos geomorfológicos a través de la monitorización de un escarpe situado en la ladera de la margen derecha del Río Duratón. Para llevar a cabo este estudio se han tomado fotografías a lo largo del talud en tres periodos de tiempo diferentes y mediante el programa *Bentley ContextCapture* se han generado los Modelos Digitales de Superficie (DSM) de alta resolución y georreferenciados. Estos modelos se han comparado, obteniéndose las diferencias de elevación, que han permitido detectar los cambios, erosivo-sedimentarios, que se han producido en la superficie entre las fechas analizadas. A partir de los cuales tiene lugar la monitorización de los procesos geomorfológicos.

A lo largo de este proyecto además se expone de forma detallada el desarrollo del procesado del modelo 3D, así como la obtención de diversos productos cartográficos.

Palabras clave: Foto- Reconstrucción 3D, SfM, nube de puntos, Modelo Digital de Superficie, MDSs de diferencias, talud, geomorfología, geovisualización.



ABSTRACT

Recent advances in the field of photogrammetry and the computer vision has allowed the improvement of the art 3D Photo-Reconstruction (FR-3D). This technique, which uses Structure from Motion (SfM) and Multi-View Stereo (MVS) reconstruction algorithms, allows to obtain three-dimensional models of the terrain of high resolution. Its application in the field of Earth Sciences is recent (Westoby et al., 2012, James and Robson, 2012), and has been applied mainly to evaluate the activity of different morphodynamic environments (coastal cliffs, gully erosion, etc.).

In this work the FR-3D technique is applied to analyze the geomorphological dynamics of a scarp modelled on the valley-side gully of the right side of the Duraton river. Photographs along the scarp have been taken with a compact digital camera (Canon PowerShot S95, 10 MP) in three different time periods, and have been processed using Bentley ContextCapture software, generating the respective 3D mesh and from these, directly the Digital Surface Models (DSM) for each date. Finally, DSMs have been compared, obtaining the difference in surface elevations and detect geomorphic changes.

Key words: 3D Photo- Reconstruction, Structures from Motion (SfM), Point clouds, Digital Surface Models, DSMs of differences , cliff, geomorphology, geovisualization.



ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1	TÉCNICA DE FR-3D.....	1
1.2	UTILIDAD TÉCNICA DE LA FR-3D.....	2
1.3	OBJETIVO DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER	3
2	ÁREA DE ESTUDIO	5
2.1	SITUACIÓN GEOGRÁFICA.....	5
2.2	CONTEXTO GEOLÓGICO Y GEOMORFOLÓGICO	6
3	METODOLOGÍA.....	11
3.1	ADQUISICIÓN DE FOTOGRAFÍAS	11
3.1.1	ACTUACIÓN PREVIA –OBTENCIÓN DE PUNTOS DE CONTROL	11
3.1.2	CÁMARA FOTOGRÁFICA.....	13
3.1.3	TOMA DE FOTOGRAFÍAS	14
3.2	RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL AUTOMÁTICA	16
4	RESULTADOS	30
4.1	RESOLUCIÓN Y PRECISIÓN O CALIDAD DE LOS DSMs	30
4.2	TRATAMIENTO DE LOS DSMs	32
4.3	COMPARACIÓN DE RESULTADOS (MODELOS DE DIFERENCIAS, DOD)	37
4.4	PRODUCTOS CARTOGRÁFICOS DERIVADOS.....	46
5	DISCUSIÓN.....	51
6	CONCLUSIONES	53
7	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54



FIGURAS

Figura 1.1. La técnica SfM requiere un solapamiento múltiple de fotografías como entrada para la extracción de las características 3D y el algoritmo de reconstrucción (Westoby et al., 2012).	1
Figura 2.1. Localización y emplazamiento del área de estudio sobre un fragmento de la ortofoto del IGN- PNOA (2014) que muestra las laderas acarcavadas del río Duratón.	5
Figura 2.2. Localización y emplazamiento del área de estudio (circulo verde) sobre un fragmento del Mapa Geológico Serie MAGNA 431 del IGME (López Olmedo et al., 2007) que muestra las litologías de los materiales acarcavados.	6
Figura 2.3. Mapa geomorfológico de los Valles Duratón y Serrano. Los valles disimétricos de la Cuenca Alta del Duratón, Muñoz y Tanarro, 2000. Rectángulo negro encuadrando el área de estudio.....	8
Figura 2.4. Perfil transversal al Valle del Río Duratón. Los valles disimétricos de la Cuenca Alta del Duratón, Muñoz & Tanarro, 2000.	9
Figura 2.5. Perfil de detalle transversal al Valle del Río Duratón. Tanarro, 2006.	10
Figura 2.6. Visualización en campo del talud objeto de estudio constituido principalmente por lutitas de tonos ocres y rojizos de la facies Velloso-Duratón.....	10
Figura 3.1. Puntos de control distribuidos en el entorno del talud y presentes en la adquisición de fotografías, así como en el proceso posterior de procesado.....	12
Figura 3.2. Distancia real de separación de los tres puntos utilizados para el control y georreferenciación del talud en sus coordenadas originales.	13
Figura 3.3. Características principales de la cámara fotográfica convencional utilizada en la toma de todas las fotografías.....	13
Figura 3.4. Metodología empleada en la toma de fotografías en campo.....	14
Figura 3.5. Recorrido fotográfico y distribución de las fotografías tomadas a lo largo del talud.	15
Figura 3.6. Flujo de trabajo seguido por ContextCapture y metodología seguida.	16
Figura 3.7. Interface de inicio de ContextCapture.	17
Figura 3.8. Dentro del Proyecto Escarpe Duratón encontramos diferentes bloques o carpetas correspondientes a las diferentes fechas de toma de fotografías.....	17
Figura 3.9. Inicio del flujo de trabajo a partir de la creación del nuevo bloque o carpeta.	18
Figura 3.10. Inserción de las fotografías que se utilizarán durante el procesado.	18
Figura 3.11. Búsqueda del directorio donde se encuentran las fotografías.	19
Figura 3.12. Actualización de los parámetros de la cámara utilizada en la toma de fotografías.	19
Figura 3.13. Edición de los puntos de control e introducción de las coordenadas de los mismos.	20
Figura 3.14. Proceso de aerotriangulación aérea marcado por ContextCapture.	21
Figura 3.15. Parámetros obtenidos como resultado del proceso de aerotriangulación, entre ellos el RMSE.	22
Figura 3.16. Parámetros de las fotografías obtenidos después del proceso de aerotriangulación.	22
Figura 3.17. Parámetros de los puntos de control obtenidos después del proceso de aerotriangulación.	23



Figura 3.18. Posición y campo visual de cada una de las fotografías que fueron utilizadas durante el proceso de triangulación.	23
Figura 3.19. Ajustes de reconstrucción marcados por ContextCapture.	24
Figura 3.20. Ajuste de la dimensión del bloque de trabajo y división en porciones para mejorar la fluidez del procesado.	25
Figura 3.21. Ajuste de los parámetros de reconstrucción.	25
Figura 3.22. Proceso de Producción marcado por ContextCapture.....	26
Figura 3.23. Formatos posibles para los productos obtenidos con ContextCapture.....	27
Figura 3.24. Propiedades más significativas de los productos OBJ obtenidos mediante ContextCapture.	27
Figura 3.25. Visualización 3D de los productos obtenidos mediante ContextCapture.....	28
Figura 3.26. Visualización 3D de los productos obtenidos mediante Acute 3D Viewer.	28
Figura 4.1. Mosaico resultado de la unión de los diferentes ficheros que se obtuvieron del programa ContextCapture para cada una de las fechas de estudio.	32
Figura 4.2. Definición del área que delimita cada uno de los DSMs a partir de la eliminación de las zonas de borde más irregulares.....	33
Figura 4.3. Modelo Digital de Superficie con fecha 6 de febrero de 2016 y máscara que delimita las zonas vegetadas de las menos vegetadas (área de cálculo).....	34
Figura 4.4. Modelo Digital de Superficie con fecha 19 de septiembre de 2015 y máscara que delimita las zonas vegetadas de las menos vegetadas (área de cálculo).....	35
Figura 4.5. Modelo Digital de Superficie con fecha 27 de agosto de 2014 y máscara que delimita las zonas vegetadas de las menos vegetadas (área de cálculo).....	36
Figura 4.6. Comparación de escarpes desde el 19 de septiembre de 2015 hasta el 6 de febrero de 2016.....	38
Figura 4.7. Histograma de clasificación del modelo de comparación de escarpes desde el 19 de septiembre de 2015 hasta el 6 de febrero de 2016.....	39
Figura 4.8. Detalle de la posición de cada una de las fotografías como ejemplo de los procesos de erosión y sedimentación producidos a lo largo del tiempo de análisis.	40
Figura 4.9. Comparación de escarpes desde el 19 de septiembre de 2015 hasta el 6 de febrero de 2016, detalles de los procesos de erosión originando surcos y regueros.....	40
Figura 4.10. Comparación de escarpes desde el 19 de septiembre de 2015 hasta el 6 de febrero de 2016, detalle de la sedimentación como resultado del transporte a favor de la pendiente en mitad de la ladera para este intervalo de tiempo.....	41
Figura 4.11. Comparación de escarpes desde el 19 de septiembre de 2015 hasta el 6 de febrero de 2016, detalle del proceso de erosión con un aumento de la profundidad de los surcos o regueros por los que discurre el agua a lo largo del tiempo.....	41
Figura 4.12. Comparación de escarpes desde el 19 de septiembre de 2015 hasta el 6 de febrero de 2016, detalle del proceso de sedimentación a favor de surcos o regueros.	41
Figura 4.13. Comparación de escarpes desde el 27 de agosto de 2014 hasta el 6 de febrero de 2016.....	42
Figura 4.14. Histograma de clasificación del modelo de comparación de escarpes desde el 27 de agosto de 2014 hasta el 6 de febrero de 2016.	43
Figura 4.15. Detalle de la posición de cada una de las fotografías como ejemplo de los procesos de erosión y sedimentación producidos a lo largo del tiempo de análisis.	44
Figura 4.16. Comparación de escarpes desde el 27 de agosto de 2014 hasta el 6 de febrero de 2016, detalle de los procesos erosivos producidos a lo largo del tiempo.	45



Figura 4.17. Comparación de escarpes desde el 27 de agosto de 2014 hasta el 6 de febrero de 2016, detalle de la sedimentación producida a media ladera para este intervalo de tiempo. ...	45
Figura 4.18. Comparación de escarpes desde el 27 de agosto de 2014 hasta el 6 de febrero de 2016, detalle de los procesos de erosión de material más competente y sedimentación del material erosionado.	45
Figura 4.19. Comparación de escarpes desde el 27 de agosto de 2014 hasta el 6 de febrero de 2016, detalle de la disminución de los procesos erosivos producidos a lo largo del tiempo.	46
Figura 4.20. Comparación de escarpes desde el 27 de agosto de 2014 hasta el 6 de febrero de 2016, detalle del proceso erosivo en las zonas más competentes y su posterior proceso de sedimentación a lo largo de la pendiente.	46
Figura 4.21. Visualización de la malla obtenida con ContextCapture para el talud de estudio con fecha 6 de febrero de 2016, en Acute3D Viewer.	47
Figura 4.22. Vista isométrica de la estructura “mesh” o malla generada con el CAD MicroStation, que muestra en cuatro vistas la elevación, la pendiente, la orientación y el sombreado del escarpe y comparación con una panorámica fotográfica, tomada el 8 de octubre de 2016.	47
Figura 4.23. Nube de puntos obtenida con ContextCapture para el talud de estudio con fecha 6 de febrero de 2016.	48
Figura 4.24. Visualización de las nubes de puntos obtenida con ContextCapture para el talud de estudio con fecha 6 de febrero de 2016 mediante ArcScene.	49
Figura 4.25. Visualización de las curvas de nivel en MicroStation, obtenidas a partir del modelo digital de superficies, con una equidistancia de 10 cm.	49



TABLAS

Tabla I. Coordenadas Geográficas tomadas en campo para los puntos de control.....	12
Tabla II. Transformación a coordenadas UTM de las medidas tomadas en campo	12
Tabla III. Datos más significativos de las fotografías tomadas en campo	15
Tabla V. Tamaño de celda que presentan cada uno de los modelos obtenidos.....	31
Tabla V. Error medio cuadrático obtenido después del proceso de triangulación en ContextCapture.	31
Tabla VI. Ficheros que componen cada uno de los Modelos de Superficie obtenidos.....	32
Tabla VII. Cantidad de puntos que componen las Nubes de Puntos generadas por ContextCapture	50

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 TÉCNICA DE FR-3D

En los últimos años el elevado número de avances producidos en el campo de la visión artificial han permitido la obtención de modelos tridimensionales del terreno de alta resolución a partir de las técnicas de Foto-Reconstrucción 3D (Eltner et al., 2015).

La Foto-Reconstrucción 3D (FR-3D) es una técnica que utiliza de forma conjunta los procesos *Structure from Motion* (SfM) y *Multi-View Stereo* (MVS). El método SfM, es un método fotogramétrico de bajo coste que permite la reconstrucción topográfica de alta resolución. El algoritmo SfM opera bajo los mismos principios que la fotogrametría estereoscópica, es decir, las estructuras 3D pueden resolverse a partir de series de solapamiento entre imágenes. La geometría de la escena, las posiciones de la cámara y la orientación, se resuelven automáticamente utilizando un procedimiento de ajuste de haces iterativo con un elevado número de elementos comunes, basado en una base de datos de elementos extraídos automáticamente de un set de múltiples imágenes con solape (Snavely, 2008), sin necesidad de especificar previamente una red de elementos con coordenadas tridimensionales conocidas (Figura 1.1).

El algoritmo *Multi-View Stereo* (MVS; Seitz et al., 2006) permite la densificación de las nubes de puntos resultantes.

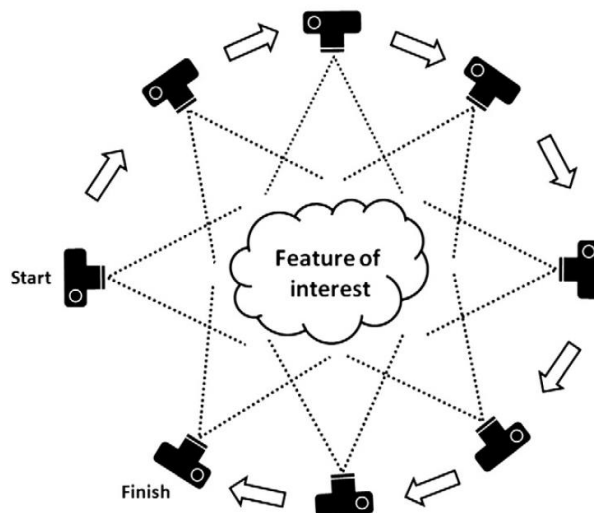


Figura 1.1. La técnica SfM requiere un solapamiento múltiple de fotografías como entrada para la extracción de las características 3D y el algoritmo de reconstrucción (Westoby et al., 2012).

Esta técnica fue desarrollada en la década de 1990 y tiene su origen en la comunidad de visión por computador (Spetsakis y Aloimonos, 1991; Boufama et al., 1993; y Szeliski y Kang, 1995) y el desarrollo de algoritmos automáticos de búsqueda de entidades homólogas en la década



anterior (Förstner, 1986; Harris y Stephens, 1988). Este algoritmo empezó a popularizarse gracias a la aparición de programas de procesamiento en la nube, siendo *Microsoft Photosynth* el más conocido. Utilizando estas herramientas, el usuario podía subir el conjunto de fotografías necesario para cubrir el objeto o escena a la nube y, automáticamente, el software calculaba la nube dispersa de puntos 3D a partir de dichas fotografías.

El resultado de un proceso de SfM es una nube de puntos discreta obtenida a partir de lo que se conoce como ajuste *Bundler* mediante el cual se produce la recolocación espacial, tanto de una serie de puntos coincidentes entre imágenes como de las posiciones de las cámaras que tomaron dichas imágenes respecto a la escena. Dichos puntos son detectados automáticamente mediante lo que se conoce como el proceso SIFT o *Scale-invariant feature transform* (Lowe, 1999; Makadia, 2007), mediante el cual se detectan puntos o características comunes entre pares de imágenes, lo que nos permite cotejar cientos de imágenes con el fin de extraer grandes cantidades de puntos comunes o puntos clave.

Estas nubes discretas son insuficientes para evaluar en detalle un objeto o escena, por eso el paso final de estos procesos de SfM suele ser una nube de puntos densa con millones de puntos que describen con más detalle las superficies y geometría de objetos. Estas nubes están formadas por un conjunto de vértices descritos en un sistema de coordenadas tridimensionales tipo XYZ y acompañados de una descripción colorimétrica en el modelo RGB, permitiendo generar Modelos Digitales de alta resolución.

1.2 UTILIDAD TÉCNICA DE LA FR-3D

Basados en la tecnología SfM encontramos en el mercado programas cuyo uso requiere de licencia como *Bentley ContextCapture*, cuya metodología se detalla a lo largo de este trabajo, o *Agisoft PhotoScan*. Ambos programas son soluciones de modelado 3D de alta calidad basados en imágenes a partir de la última tecnología multi-vista de la reconstrucción 3D. Esta tecnología opera con imágenes arbitrarias y es eficiente tanto en condiciones controladas como no controladas. Las fotos pueden ser tomadas desde cualquier posición, siempre que el objeto a ser reconstruido sea visible en al menos dos fotos, aunque es recomendable que sea visible en un número más elevado.

En general, el objetivo final de procesamiento de ambos programas es construir un modelo 3D con textura. La metodología de procesamiento de fotografías y la construcción de modelos 3D comprende tres etapas principales.

1. **Alineación de la cámara:** Ambos programas buscan los puntos comunes en las fotografías y los comparan, encuentran la posición de la cámara para cada imagen y refinan los parámetros de calibración de la misma. Esto da como resultado una malla de triangulación para *ContextCapture* y una nube de puntos para *PhotoScan*. Es posible exportar estos modelos para su uso en programas externos.
2. **Reconstrucción densa de la malla poligonal o nube de puntos:** Sobre la base de las posiciones e imágenes de la cámara se estiman las nuevas posiciones para densificar la malla o nube de puntos. Después de haber construido ambos modelos puede ser



necesario editarlos para realizar algunas correcciones. Es posible exportar ambos modelos y editarlos por otros programas e importar de nuevo al programa original para continuar con el procesamiento.

3. **Trabajar con la geometría:** Texturizar el modelo y/o utilizar para la producción de ortofotos o modelos de superficie.

En el mercado también podemos encontrar programas libres basados en la metodología SfM, como por ejemplo *Autodesk 123D Catch*. Este programa presenta una metodología de procesamiento mucho más sencilla pero más limitada. Únicamente necesitamos indicar las imágenes que formarán parte del modelo 3D, dichas imágenes son procesadas en un servidor externo de *Autodesk*, por tanto, será necesario tener conexión a internet. Tras unos minutos obtenemos el objeto modelado en 3D en la interfaz del programa.

El tratamiento de los productos obtenidos con esta técnica se puede llevar a cabo con programas libres como *CloudCompare* que nos permite la comparación de las nubes de puntos temporales y su georreferenciación. También podemos utilizar programas con licencia de *Bentley* para el tratamiento de la malla, su representación y su visualización o de *Esri*, mediante *ArcScene* es posible transformar las nubes de puntos en modelos digitales de elevaciones o en morfologías de superficies TIN.

Con respecto a su aplicación en el campo de las Ciencias de la Tierra se trata de una técnica nueva cuya difusión actual se ha realizado a partir de los trabajos de Westoby et al., 2012; Fonstad et al., 2013; y Gómez-Gutiérrez et al., 2014, aplicados fundamentalmente a evaluar la dinámica en ambientes morfodinámicos (acantilados costeros, glaciares rocosos). Dentro del campo de la modelización de los procesos geomorfológicos, en el que se centra este trabajo, destacan los trabajos de Castillo et al., 2012, James et al., 2012, Gómez-Gutiérrez et al., 2014, Tanarro & Gómez, 2014, y Tanarro & Gómez (en revisión). Un trabajo que resume el potencial de la técnica y sus aplicaciones en el campo de las ciencias de la tierra, en especial en la Geografía Física, es el de Smith et al. (2015).

1.3 OBJETIVO DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER

El objetivo genérico de este trabajo es estudiar la erosión de un escarpe natural en una ladera del valle del Río Duratón (Segovia) durante el periodo transcurrido entre agosto del 2014 y febrero del 2016, utilizando la técnica de la Foto-Reconstrucción 3D.

A partir de fotografías tomadas en tres fechas diferentes con cámaras convencionales a lo largo de este periodo temporal, se pretende obtener varios Modelos de Superficie (DSM) del escarpe, de alta calidad y georreferenciados, cuya comparación nos permita construir modelos de diferencias de elevación (DOD) entre las fechas estudiadas, con los cuales estudiar la evolución geomorfológica del talud y estimar el volumen de material erosionado y sedimentado en el escarpe.

Dado, que es una técnica relativamente novedosa se plantea también como objetivo de este TFM exponer con cierto detalle todo el desarrollo del procesado del modelo 3D, así como la



obtención de diversos productos cartográficos. Tras cumplir el objetivo principal se realizará una evaluación de la técnica de Foto-Reconstrucción 3D aplicada sobre los fenómenos geomorfológicos y de los productos cartográficos obtenidos mediante la misma.

2 ÁREA DE ESTUDIO

2.1 SITUACIÓN GEOGRÁFICA

La zona de estudio se sitúa en el borde sur de la Cuenca del Duero, próximo al límite con el Sistema Central, dentro de la provincia de Segovia. Concretamente, los estudios realizados de FR-3D se han aplicado sobre un talud situado en el valle del río Duratón (afluente del río Duero), a 2 km de distancia del propio pueblo de Duratón (Figura 2.1).

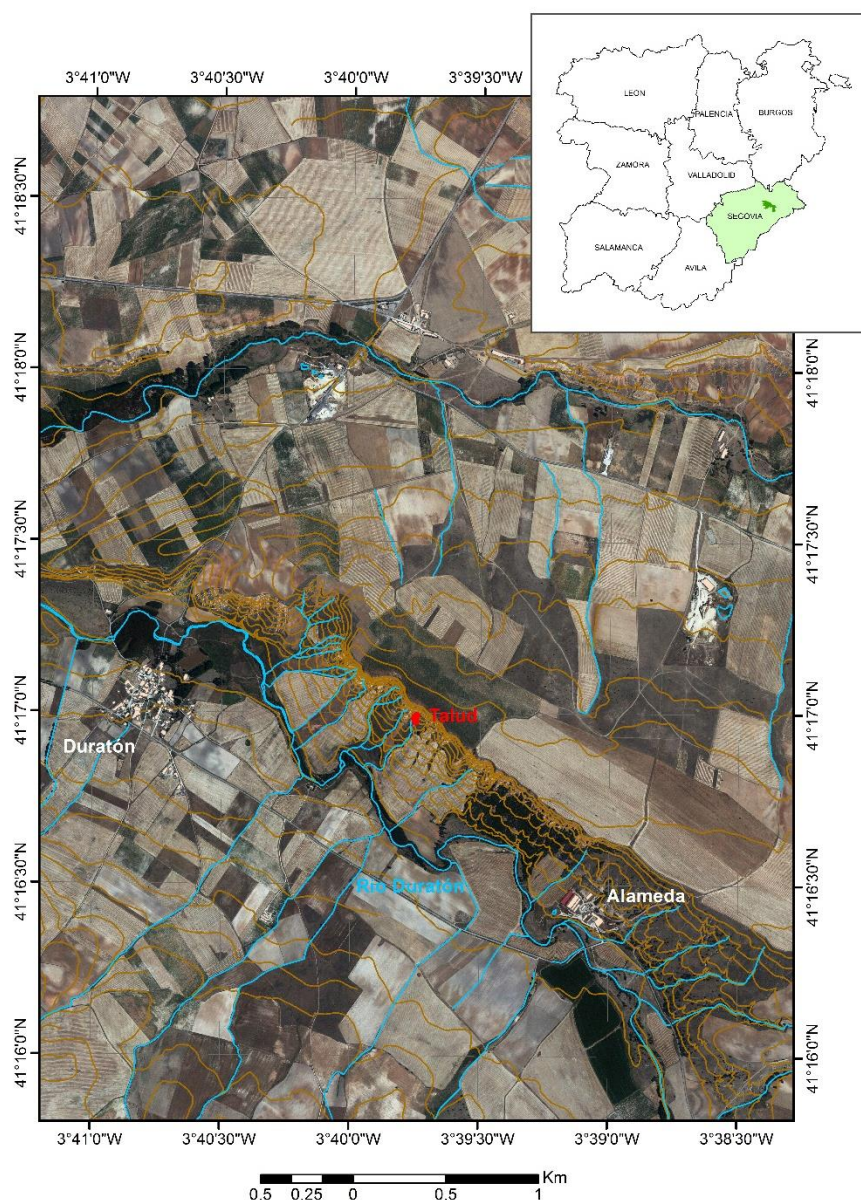


Figura 2.1. Localización y emplazamiento del área de estudio sobre un fragmento de la ortofoto del IGN-PNOA (2014) que muestra las laderas acarcavadas del río Duratón.

El relieve del área se caracteriza por campiñas y planicies mesetarias con alturas comprendidas entre 1000 y 1100m destacando al sureste las elevaciones de Somosierra con cotas superiores

de los 2000 m. Todo este conjunto ocasiona un clima muy extremo, con inviernos fríos con frecuentes nevadas y veranos con temperaturas suaves y agradables.

La red fluvial se articula fundamentalmente en torno al río Duratón y su efímera red tributaria, constituida por los ríos Serrano, Caslilla, San Juan, Cerezuelo y del Puerto (este último es el nombre que recibe el río Duratón en su tramo serrano).

Desde el punto de vista demográfico, la característica principal es el gran número de poblaciones distribuidas de forma regular a lo largo de toda la zona. Sepúlveda es la población más importante, destacando además Santo Tomé del Puerto, Cerezo de Arriba, Castillejo de Mesleón, Soto de Sepúlveda, Duruelo y un sinfín de pequeños pueblos equidistantes unos de otros por una decena de kilómetros.

2.2 CONTEXTO GEOLÓGICO Y GEOMORFOLÓGICO

Geológicamente, la zona objeto de estudio se sitúa en el borde meridional de la Cuenca del Duero, una amplia depresión rellena de sedimentos cenozoicos y cuaternarios, en su límite con el Sistema Central, un zócalo de rocas Precámbrico-Paleozoicas (Figura. 2.2).

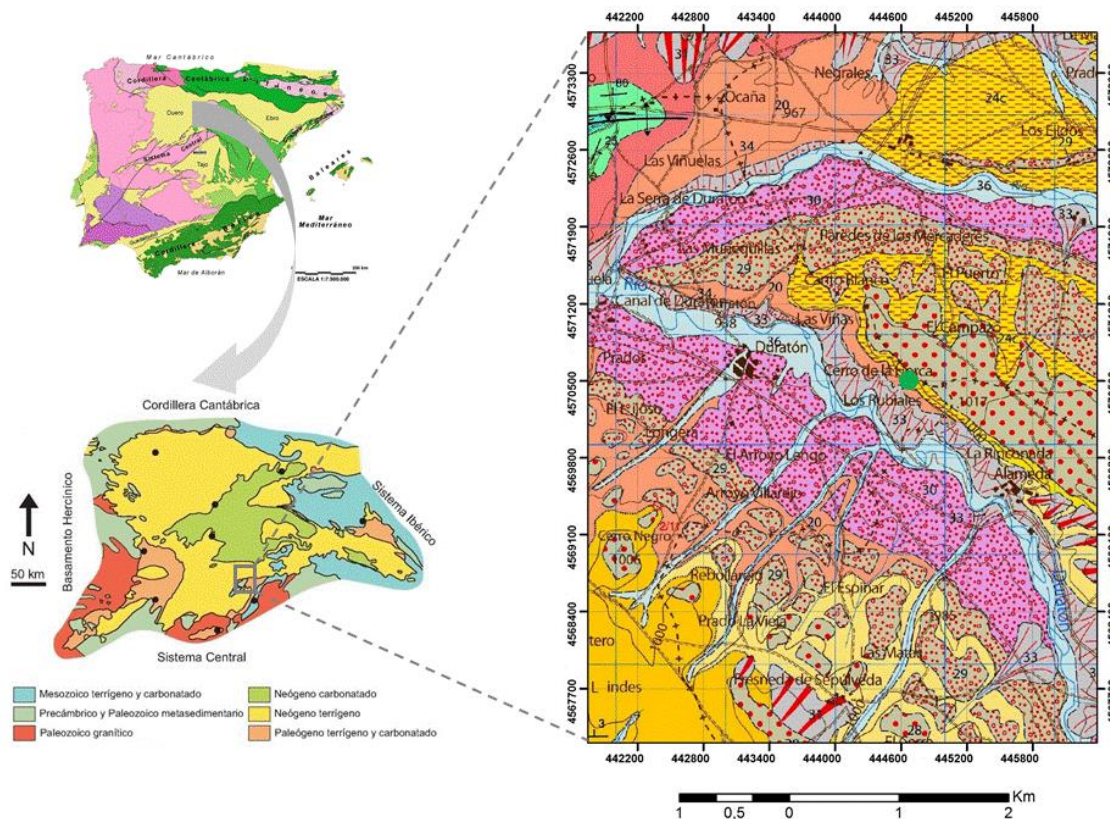


Figura 2.2. Localización y emplazamiento del área de estudio (circulo verde) sobre un fragmento del Mapa Geológico Serie MAGNA 431 del IGME (López Olmedo et al., 2007) que muestra las litologías de los materiales acarcaavados.



Concretamente, el área de estudio se sitúa en la Cuenca Alta del Río Duratón, dentro de la Depresión de Duruelo-Perorrubio, que aparece a modo de corredor NE-SO constituido por sedimentos cenozoicos.

Desde el punto de vista estratigráfico, en la zona se diferencian 2 conjuntos de depósitos (Figura 2.2):

- Sedimentos detríticos cenozoicos (Mioceno) compuestos esencialmente por lutitas rojas con niveles de conglomerados y lutitas ocre con cantos y niveles carbonatados (López Olmedo et al., 2007). De acuerdo con Tanarro García (2006), en el valle del Duratón, estos materiales pueden ser divididos en varias facies sedimentarias cuyas características están condicionadas por la composición litológica del área fuente (Figuras. 2.3 y 2.4).
 - ◆ Facies Vellosillo-Duratón: Constituida por sedimentos limoso-arenosos de color ocre o rojizo con intercalaciones conglomeráticas polimícticas y arenosas.
 - ◆ Facies Perorrubio-Vilafranca: Constituidas por potentes niveles arcillo-limo-arenosos de color rojizo, alternando con niveles arenosos y conglomeráticos.
 - ◆ Facies Sotillo-Duruelo: Caracterizadas por niveles limo-arenosos entre los que se intercalan de forma regular niveles de conglomerados metamórficos.
 - ◆ Facies Castillejo-Soto: Dominados por niveles arcillosos o lutíticos de color rojizo intenso, con niveles intercalados de cantos y bloques con matriz arenosa.

Desde el punto de vista sedimentológico las formaciones sedimentarias de edad Cenozoica pueden integrarse dentro de tres importantes abanicos aluviales, el Abanico de Santa Marta, el Abanico de Somosierra y el Abanico de Riaza (López Olmedo et al., 2007).

El Abanico de Santa Marta está ampliamente desarrollado en los interfluvios del río Duratón, aunque no presenta un ápice bien definido. En su composición se combinan fragmentos de roca metamórficas del zócalo junto con rocas carbonatadas más modernas. Su edad es Mioceno-Inferior y contiene las Facies Vellosillo- Duratón y Perorrubio- Vilafranca.

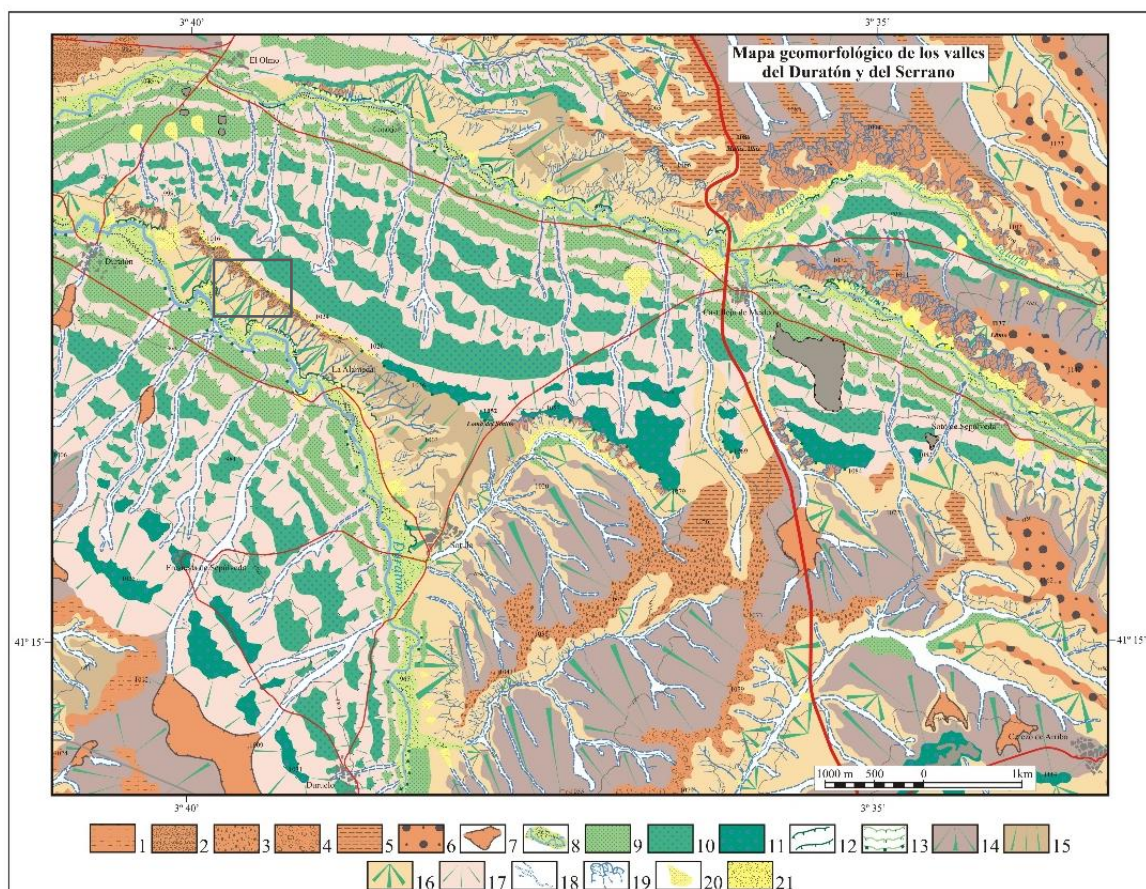
El Abanico de Somosierra está bien reconocido en ambos márgenes del río Duratón. Se trata de un sistema deposicional desarrollado durante el Mioceno Inferior-Medio compuesto fundamentalmente por bloques y cantos de gneises, arenas arcóscas y niveles limo-arcillosos ocre cuya área fuente está formada por materiales metamórficos que condicionan las características litológicas del complejo, dentro del cual se engloban las Facies Sotillo- Duruelo.

El Abanico de Riaza situado en el sector más oriental presenta su máximo desarrollo durante el Mioceno Medio-Superior. Este sistema está compuesto por una potente formación detrítica muy heterométrica constituidas por niveles de lutitas o arcillas rojas que intercalan con lechos conglomeráticos formados por cantos y bloques de cuarzo, cuarcita, esquistos y gneises. Dentro de este cuerpo se encuentran las Facies Castillejo-Soto.

- Depósitos cuaternarios relacionados con la red fluvial actual, correspondiendo a rañas y terrazas que se disponen casi de forma paralela a los cursos fluviales actuales.

De acuerdo con Cadavid et al., 1971, la estructura de la zona está marcada por un zócalo Precámbrico-Paleozoico compartimentado en bloques elevados y hundidos, orientados según una dirección NE-SO. Los materiales más antiguos del zócalo afloran coincidiendo con los bloques levantados, quedando los bloques hundidos cubiertos bajo sedimentos cenozoicos como es el caso de la Depresión de Duruelo-Perorrubio. Los sedimentos cenozoicos se encuentran modelados por la erosión y el relleno cuaternario.

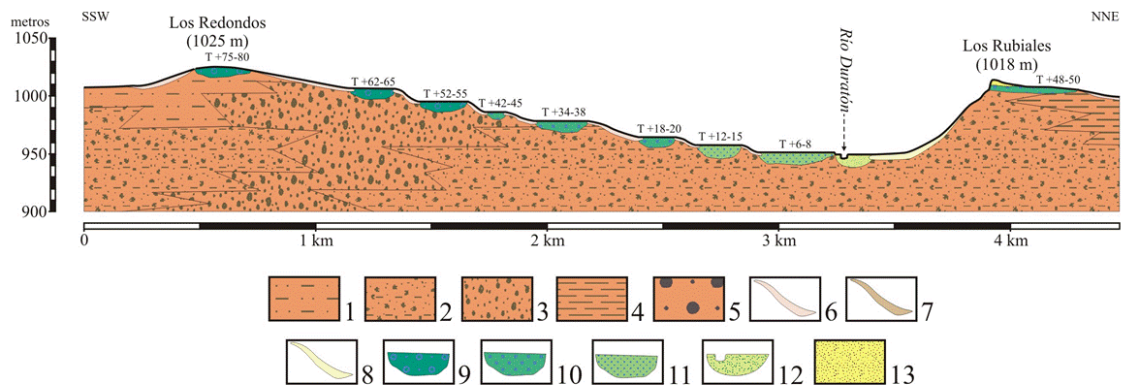
Desde el punto de vista morfoestructural, la cuenca Alta del Duratón está marcada por las depresiones fluviales de los 2 ríos que discurren por la zona, el principal río Duratón y el secundario Río Serrano.



(1) Superficies alomadas sobre arcillas rojas y conglomerados de la Facies de Perorrubio- Villafranca, (2) Superficies alomadas sobre arcillas, limos, arenas y niveles conglomeráticos de la Facies de Vellosillo- Duratón, (3) Superficies alomadas sobre arenas arcóscas, arcillas y conglomerados de la Facies Sotillo- Duruelo, (4) Superficie alomadas sobre bloques y cantos de gneis y arenas arcóscas de la Facies de Cerezo de Abajo, (5) Superficies alomadas sobre lutitas rojas y conglomerados de la Facies de Castillejo- Soto, (6) Plataformas alargadas de la Raña, (7) Depresiones con márgenes difusos, (8) Llano aluvial con indicación del curso actual y lechos abandonados, (9) Terrazas aluviales bajas, (10) Terrazas aluviales medias, (11) Terrazas aluviales altas, (12) Escarpes por zapa lateral, principales y pequeños, (13) Bordes de terraza, difusos y suaves y empinados, (14) Glacis suaves desarrollados desde las superficies alomadas Miocenas y de la Raña, (15) Glacis de ladera (Nivel superior), (16) Glacis de ladera (Nivel inferior que enlaza con los Fondos Aluviales), (17) Glacis de enlace de los niveles de terrazas, (18) Arroyos o valles secundarios de fondo plano y/o en cuna, (19) Ceberas o círculos erosivos y red de barrancos, cárcavas y regueros, (20) Conos de acumulación, (21) Recubrimientos eólicos.

Figura 2.3. Mapa geomorfológico de los Valles Duratón y Serrano. Los valles disimétricos de la Cuenca Alta del Duratón, Muñoz y Tanarro, 2000. Rectángulo negro encuadrando el área de estudio.

La morfología de la red de drenaje del Río Duratón se caracteriza por tramos muy rectilíneos según la dirección NO-SE, y una acusada disimetría geomorfológica en su perfil transversal, con vertientes orientadas al E extensas, tendidas y estables donde abundan los recubrimientos detríticos recientes y vertientes orientadas al O cortas y empinadas, donde el sustrato Mioceno aflora con amplitud y se ve afectado por un activo acarcavamiento (Figura 2.4).



(1) Arcillas rojas y conglomerados de la Facies de Perorrubio- Vilafranca, (2) Arcillas, limos, arenas y niveles conglomeráticos de las Facies de Vellosillo- Duratón, (3) Arenas arcóscicas, arcillas y conglomerados de la Facies de Sotillo- Duruelo, (4) Lutitas rojas y conglomerados de la Facies de Castillejo- Soto, (5) Niveles pedregosos de la Raña, (6) Glacis de enlace de los niveles de terrazas, (7) Glacis de laderas (niveles superior), (8) Glacis de ladera (nivel inferior que enlaza con los fondos aluviales), (9) Terrazas aluviales altas, (10) Terrazas aluviales medias, (11) Terrazas aluviales bajas, (12) Fondos aluviales, (13) Recubrimientos eólicos.

Figura 2.4. Perfil transversal al Valle del Río Duratón. Los valles disimétricos de la Cuenca Alta del Duratón, Muñoz & Tanarro, 2000.

El estudio detallado de la geomorfología permite reconocer en las vertientes orientadas al E (margen izquierda del río Duratón) sucesivos niveles de terrazas unidos entre sí por un glacis detrítico muy suave que se encuentra siempre a media ladera, sirviendo como enlace entre los diferentes niveles de terraza, entre la raña y las terrazas o entre los interfluvios y el valle. Se trata de formas de mediano y pequeño desarrollo cuyo depósito es muy similar a las terrazas (Figura 2.4).

En las vertientes orientadas al O (margen derecho del río Duratón, posición del escarpe de estudio) encontramos glacis cortos y bastante inclinados al pie de la vertiente como resultado de una dinámica relacionada con la arroyada en manto sobre el material Mioceno, originando laderas de pendientes abruptas, entre los 20° y 25° de inclinación. Posteriormente, la arroyada concentrada ha modelado un conjunto de cárcavas con sus cabeceras sobre material detrítico (Figura 2.5).

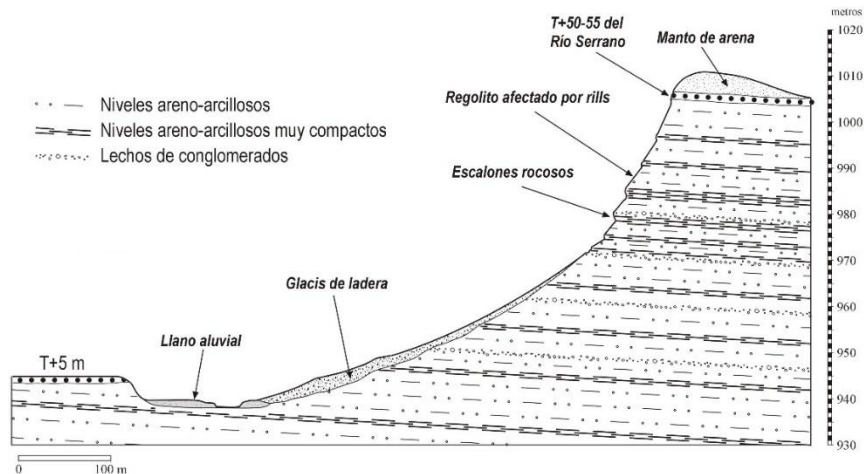


Figura 2.5. Perfil de detalle transversal al Valle del Río Duratón. Tanarro, 2006.

Existen dos hipótesis o líneas de investigación que explican las causas de esta disimetría. Por un lado, un basculamiento tectónico de la Cuenca del Duero que se ha prolongado hasta la actualidad (Fernández y Garzón, 1994). Y, por otro lado, la naturaleza morfoclimática de la zona, desde el cuaternario hasta la actualidad, explicaría el desplazamiento lateral de los cursos fluviales y su desarrollo (Muñoz y Tanarro, 2002).

El escarpe objeto de estudio se sitúa en el margen derecho del río Duratón, presenta una longitud de unos 50 m y una altura en la parte central de 10 m (Fig. 2.6).

El talud está constituido por lutitas de tonos ocres y rojizos con intercalaciones de niveles conglomeráticos polimícticos de hasta 1m de espesor, pertenecientes a las facies Velosillo-Duratón. Los conglomerados están formados por cantos de rocas metamórficas y, en ocasiones, cantos de naturaleza calcárea. Dentro de la secuencia también se identifican paleosuelos con buena continuidad lateral.



Figura 2.6. Visualización en campo del talud objeto de estudio constituido principalmente por lutitas de tonos ocres y rojizos de la facies Velosillo-Duratón.

3 METODOLOGÍA

La metodología seguida para la consecución de los objetivos fijados en este trabajo puede dividirse en varios procesos principales.

1. Adquisición de fotografías en campo del escarpe estudiado y toma de coordenadas de puntos de control.

2. Reconstrucción tridimensional automática de las fotografías a partir del programa *ContextCapture*, que incluye una serie de pasos para obtener Modelo Digitales de Superficies y otros productos cartográficos derivados.

Ambos procesos se desarrollarán en los apartados que aparecen a continuación.

3.1 ADQUISICIÓN DE FOTOGRAFÍAS

3.1.1 ACTUACIÓN PREVIA –OBTENCIÓN DE PUNTOS DE CONTROL

En campo, previamente a la toma de fotografías se colocaron tres estacas de madera para ser utilizadas como puntos de control en el escalado de los modelos.

Dado que se tomaron fotografías en distintos periodos de tiempo encontraremos imágenes con estacas de madera e imágenes donde se actualizaron las estacas de madera por varillas de plástico de color rojo con el fin de facilitar una mejor visión como puntos de control (Figura 3.1).

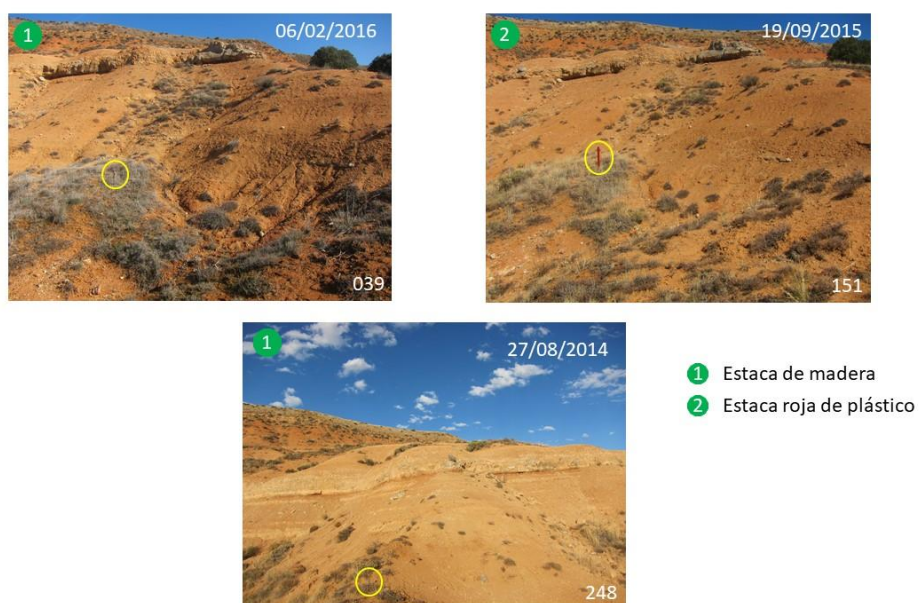




Figura 3.1. Puntos de control distribuidos en el entorno del talud y presentes en la adquisición de fotografías, así como en el proceso posterior de procesado.

Tras la toma de fotografías, fueron registradas las coordenadas geográficas de cada una de las estacas o varillas tomadas como puntos de control, para ello se utilizó una aplicación GPS de móvil (*Mis Coordenadas GPS*) cuyo formato incluye grados, minutos y segundos referidos al Sistema de Referencia de Coordenadas WGS-84. Para cada punto se tomaron cinco medidas y, eliminando las medidas menos fiables, se eligió el valor con mayor representación (Tabla I).

Finalmente, las coordenadas geográficas fueron transformadas a coordenadas proyectadas UTM (Tabla II).

Tabla I. Coordenadas Geográficas tomadas en campo para los puntos de control

ESTACA 1		ESTACA 2		ESTACA 3	
Medida 1	Lat: 41.282918 Long: -3.662512	Medida 1	Lat: 41.283056 Long: -3.662576	Medida 1	Lat: 41.283200 Long: -3.662442
Medida 2	Lat: 41.282914 Long: -2.662531	Medida 2	Lat: 41.283051 Long: -3.662567	Medida 2	Lat: 41.283187 Long: -3.662422
Medida 3	Lat: 41.282889 Long: -3.662542	Medida 3	Lat: 41.283055 Long: -3.662559	Medida 3	Lat: 41.283184 Long: -3.662466
Medida 4	Lat: 41.282916 Long: -3.662527	Medida 4	Lat: 41.283069 Long: -3.662558	Medida 4	Lat: 41.283205 Long: -3.662449
Medida 5	Lat: 41.282931 Long: -3.662507	Medida 5	Lat: 41.283060 Long: -3.662553	Medida 5	Lat: 41.283209 Long: -3.662449

Error de exactitud 5 m.

Tabla II. Transformación a coordenadas UTM de las medidas tomadas en campo

ESTACA 1	ESTACA 2	ESTACA 3
xy= 444520, 4570376	xy= 444517, 4570392	xy=444526, 4570408

La distancia que separa cada uno de los puntos de control se midió en campo con una cinta métrica. Siguiendo la trayectoria de fotografiado cada una de las estacas fue numerada, siendo la estaca 1 la primera que aparece en las fotografías, la estaca número 2 la segunda y la estaca número 3 la última en aparecer. Teniendo en cuenta esta numeración se ha generado la Figura 3.2 que muestra la distancia que separa cada una de las estacas. Las estacas 1 y 2 están separadas 16,35 m y las estacas 2 y 3 están separadas 17,91 m.

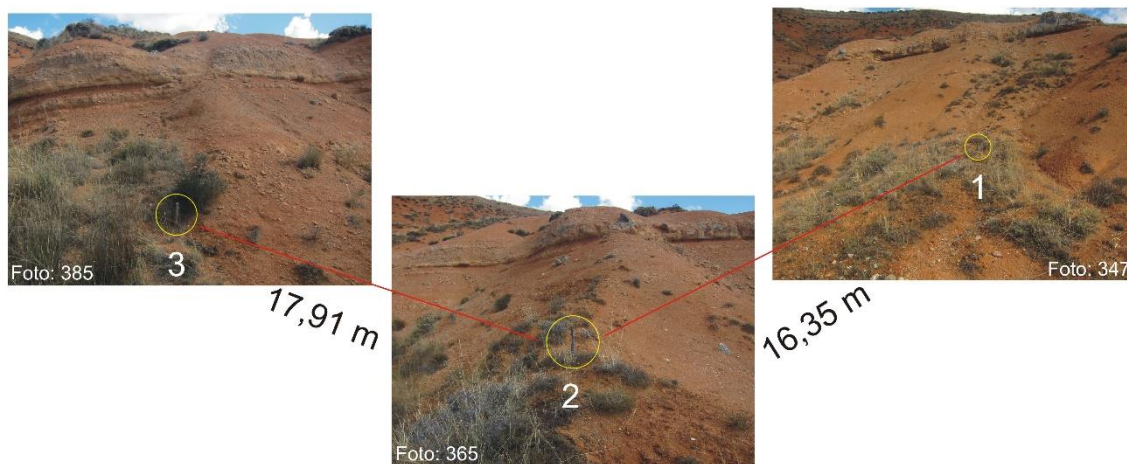


Figura 3.2. Distancia real de separación de los tres puntos utilizados para el control y georreferenciación del talud en sus coordenadas originales.

Conocer esta distancia entre los puntos de control nos permitiría realizar el escalado del escarpe durante la generación de las nubes de puntos en el caso de no conocer las coordenadas de cada uno de los puntos de control.

3.1.2 CÁMARA FOTOGRÁFICA

En la toma de fotografías se utilizó una cámara digital compacta de la marca Canon, en concreto se empleó el modelo *Canon Powershot S90* con 10 Mp. Sus características principales se muestran en la Figura 3.3, que aparece a continuación.



Modelo		Canon
Tipo de Cámara		Compacta, sin visor
Sensor de imagen	Tipo	CCD
	Tamaño	1/1,7" (7.44 x 5.58 mm)
Resolución	Total	10 Mp
	Efectiva	10 Mp
Filtro de color		RGB
Distancia focal	Digital	6 – 22,5 mm
	35 mm	28 – 105 mm
Apertura	Máxima (W-T)	f2 – f 4.9
	Mínima (W-T)	f8 – f8
Zoom	Óptico	3,8x
	Digital	4x
Disparo simple	Archivos	JPEG, RAW
	Resoluciones (en píxeles)	3.648 x 2.736 2.816 x 2.112 2.272 x 1.704 1.600 x 1.200 640 x 240

Figura 3.3. Características principales de la cámara fotográfica convencional utilizada en la toma de todas las fotografías.

Durante el procesado de las fotografías tendrán especial importancia el tamaño del sensor (dimensión mayor del sensor) y longitud focal, estos parámetros condicionarán la posición de cada una de las fotografías dentro del procesado de triangulación inicial.

3.1.3 TOMA DE FOTOGRAFÍAS

En función de nuestra propia experiencia y de las recomendaciones básicas en la bibliografía y/o manuales de los diferentes programas, a la hora de tomar fotografías, se tuvo especial cuidado en los siguientes aspectos:

- Posicionamiento en un correcto ángulo de fotografiado.
- Solape entre fotografías consecutivas superior al 60%.
- Evitar objetos sin textura, brillantes o en movimiento.
- Condiciones meteorológicas favorables evitando las zonas horarias de mayor luz.
- Utilización de una cámara con resolución superior a 5 Mpx. Se deberá evitar el uso de lentes o de zoom.
- Empleo de sensibilidad ISO al mínimo valor.

Teniendo en cuenta todos estos aspectos, las fotografías se tomaron durante franjas horarias de menor intensidad lumínica, siguiendo toda la longitud del talud, con un recorrido paralelo al mismo y una distancia aproximada de 3 metros con respecto a su pie.

Se empleó un plano general, posicionando la cámara con ángulo de 90º con respecto al suelo originando así un encuadre horizontal (Figura 3.4). Las especificaciones de la cámara empleada también se adaptan a las características anteriores y no se empleó zoom en ninguna de las fotos.

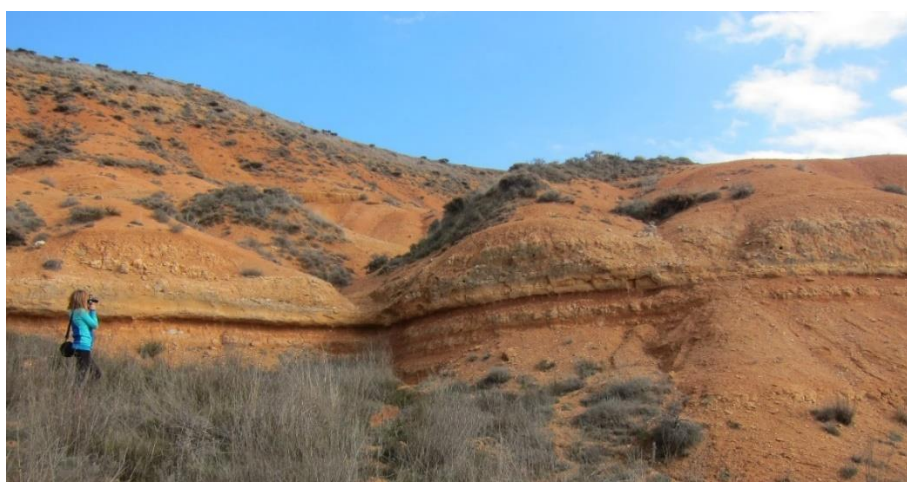


Figura 3.4. Metodología empleada en la toma de fotografías en campo.

El proceso de adquisición, consistió en la toma de una imagen aproximadamente cada medio metro, asegurándonos así que cada elemento fotografiado aparece al menos en tres fotografías y que se produce un solape de imágenes consecutivas superior al 60%. De este modo, podemos garantizar un correcto procesamiento y un buen recubrimiento del modelo.

En la Figura 3.5 podemos apreciar la posición y distribución de la toma fotográfica, ya sobre un modelo foto-reconstruido.

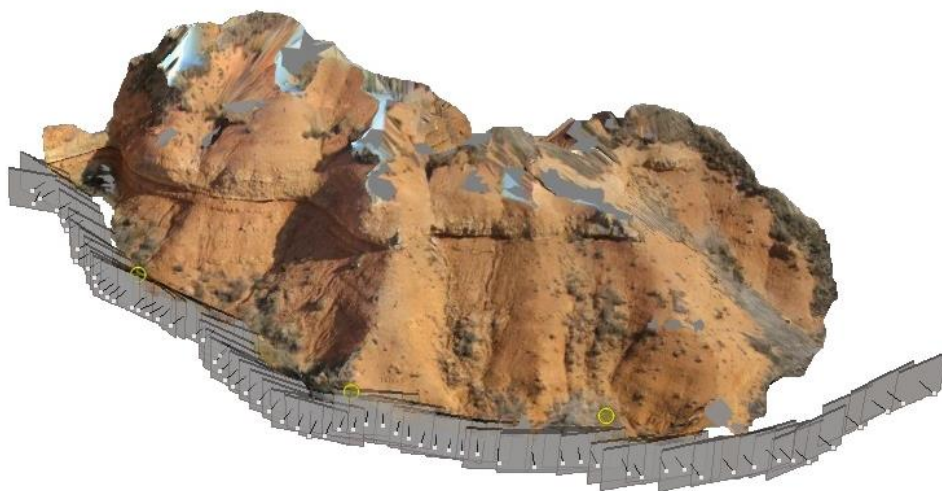


Figura 3.5. Recorrido fotográfico y distribución de las fotografías tomadas a lo largo del talud.

A modo de resumen, en la siguiente tabla se muestran los datos más significativos de todas las imágenes tomadas en las diferentes fechas para el escarpe objeto de estudio (Tabla III).

Tabla III. Datos más significativos de las fotografías tomadas en campo

	Fecha adquisición	Persona que tomó las fotografías	Número fotos	Puntos control
Escarpe Duratón	06/02/2016	Luis Miguel Tanarro Lourdes Rodríguez	64	3
	19/09/2015	Luis Miguel Tanarro	65	3
	27/08/2014	Luis Miguel Tanarro,	64	3

3.2 RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL AUTOMÁTICA

Tras la adquisición de las fotografías se llevó a cabo la fase de Reconstrucción Tridimensional. Durante esta etapa se ha utilizado el programa comercial *ContextCapture* de la empresa Bentley. Se trata de un programa que utiliza los recursos del ordenador para realizar el proceso de reconstrucción tridimensional, por tanto, si no disponemos de un ordenador con un mínimo de 8 GB de RAM y una tarjeta gráfica NVIDIA, el proceso puede llegar a ser muy lento y en algunos casos es imposible crear reconstrucciones de muy alta calidad. Sin embargo, se trata de un programa que nos permite tener un gran control sobre los parámetros de creación de la nube de puntos en función de nuestros conocimientos de los mismos.

Podemos dividir el proceso de Reconstrucción Tridimensional en cinco etapas o fases marcadas por el flujo de trabajo del programa *ContextCapture*, utilizaremos dichas etapas para explicar la metodología seguida (Figura 3.6).

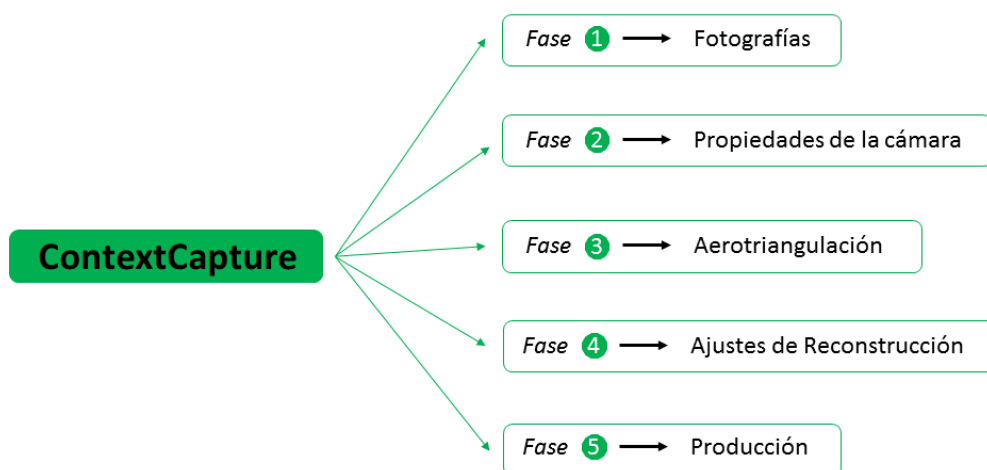


Figura 3.6. Flujo de trabajo de ContextCapture y metodología seguida.

La primera vez que se accede a al programa *Bentley ContextCapture* es necesario generar un nuevo proyecto "New Project" (Figura 3.7).

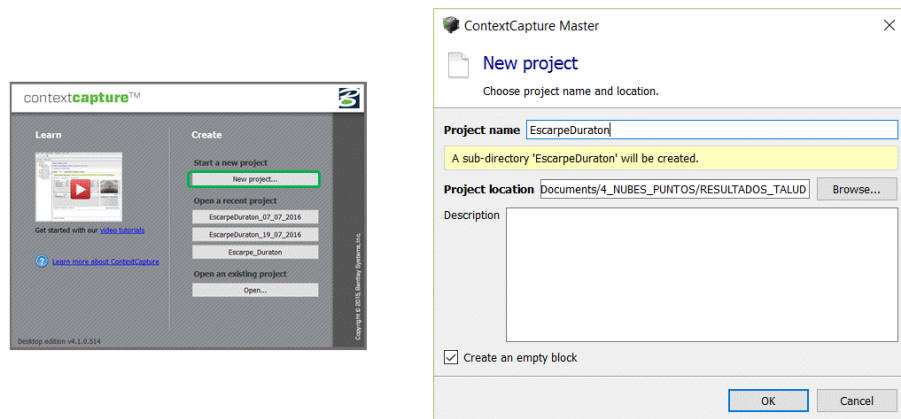


Figura 3.7. Interface de inicio de ContextCapture.

Un único proyecto puede contener distintos productos generados sobre fotografías tomadas en diferentes fechas, cada elemento obtenido se agrupa dentro de distintas carpetas denominadas “Block” cuyo contenido son las fotografías empleadas y todos los procesos realizados sobre ellas.

Es posible modificar el nombre del bloque, así como añadir un comentario que describa la información de cada uno y los productos obtenidos, como se muestra en la imagen que aparece a continuación Figura 3.8.

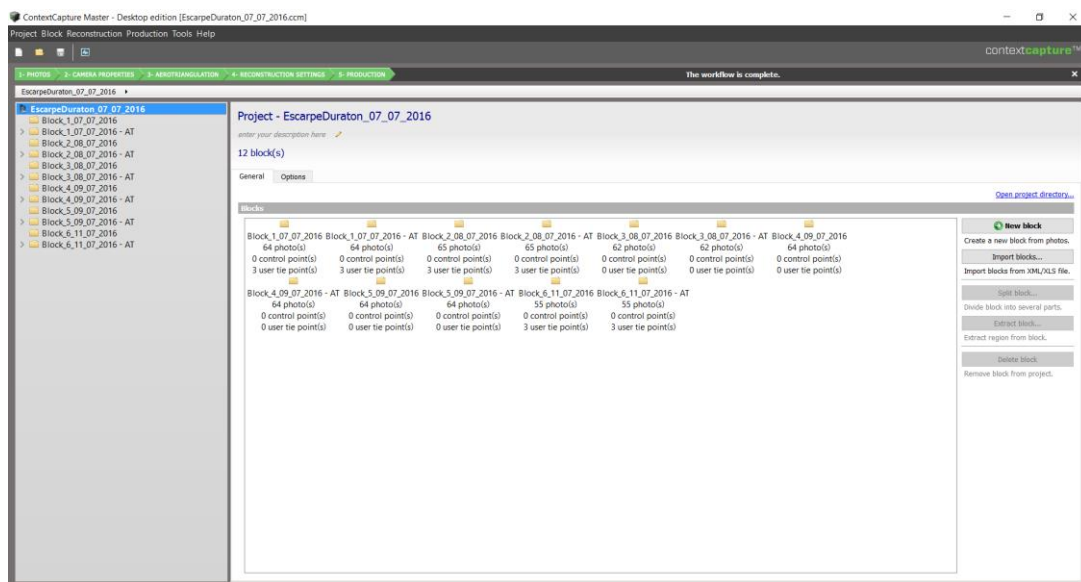


Figura 3.8. Dentro del Proyecto Escarpe Duratón encontramos diferentes bloques o carpetas correspondientes a las diferentes fechas de toma de fotografías.

Comenzamos el flujo de trabajo de ContextCapture originando un nuevo bloque y siguiendo cada una de las fases que nos va marcando el programa (Figura 3.9).

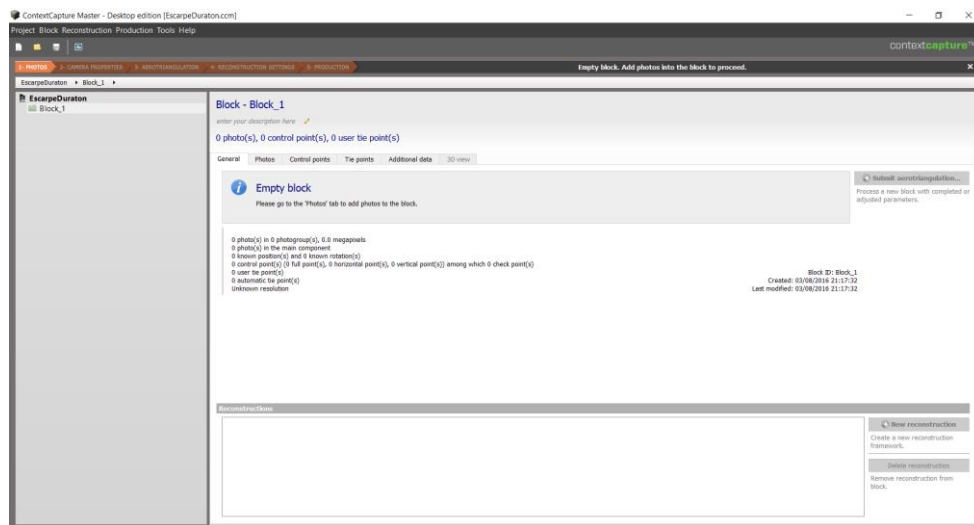
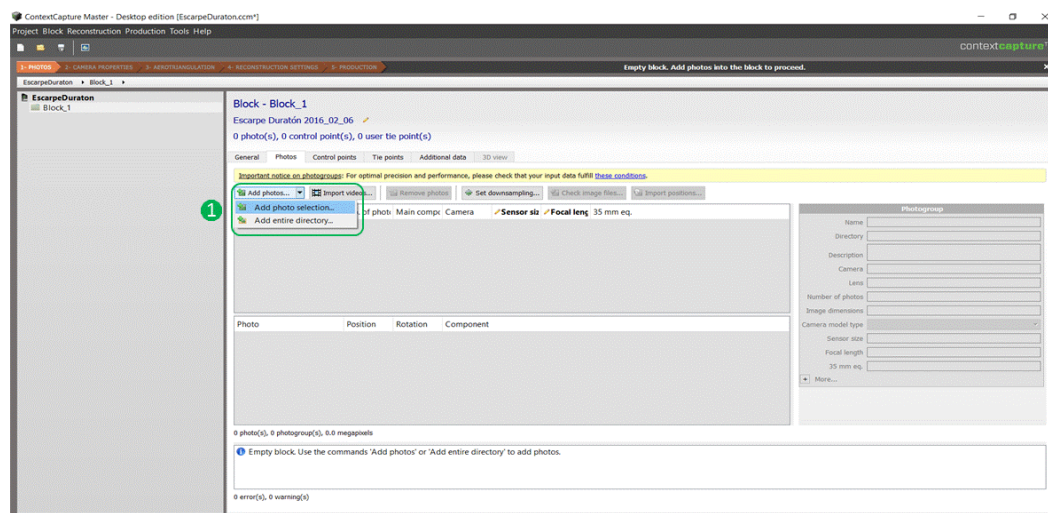


Figura 3.9. Inicio del flujo de trabajo a partir de la creación del nuevo bloque o carpeta.

Fase 1 → Fotografías

En esta primera etapa se introducen las fotografías que van a formar parte del proceso de reconstrucción tridimensional. *ContextCapture* permite agregar fotografías en varios formatos: JPEG, TIFF y RAW.

Es posible combinar imágenes y vídeos de una misma zona para realizar la reconstrucción tridimensional. La inserción se puede realizar en bloque, marcando la carpeta donde se encuentran o seleccionando una por una (Figuras 3.10 y 3.11).



1 Insertar las fotografías

Figura 3.10. Inserción de las fotografías que se utilizarán durante el procesado.

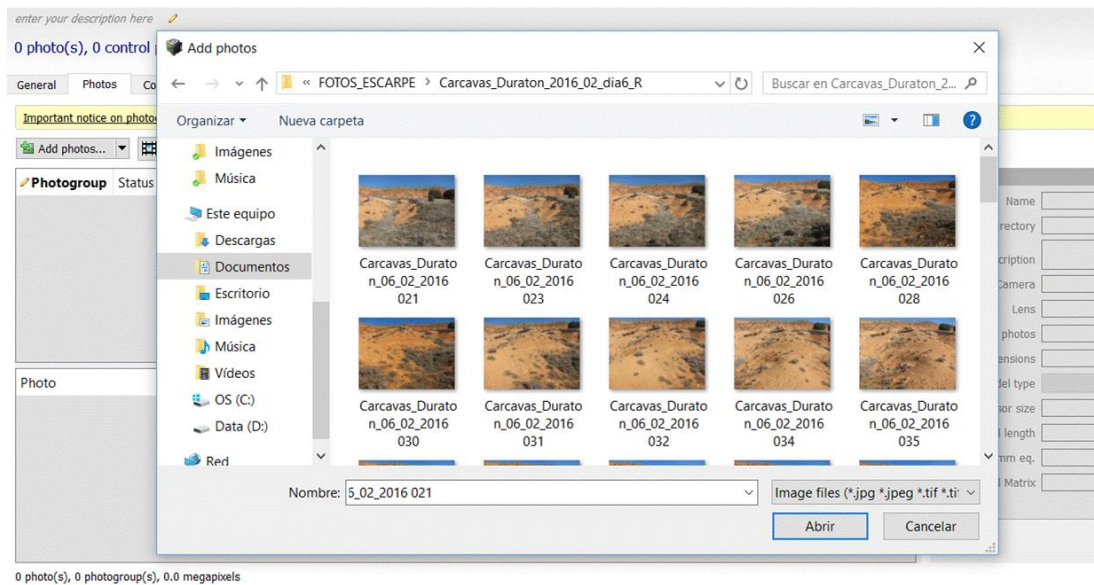


Figura 3.11. Búsqueda del directorio donde se encuentran las fotografías.

Para la realización de este proyecto únicamente se han utilizado fotografías en formato JPG realizadas todas ellas con la misma cámara fotográfica.

Fase 2 → Propiedades de la cámara

Tras la inserción de las fotografías es necesario fijar las características de la cámara, tamaño del sensor y longitud focal. En el caso de que la cámara no está registrada en la base de datos del programa, las propiedades de la cámara se deben introducir manualmente (Figura 3.12). Los parámetros de la cámara utilizada aparecen en el apartado 3.1.2 junto con las características más importantes de la misma.

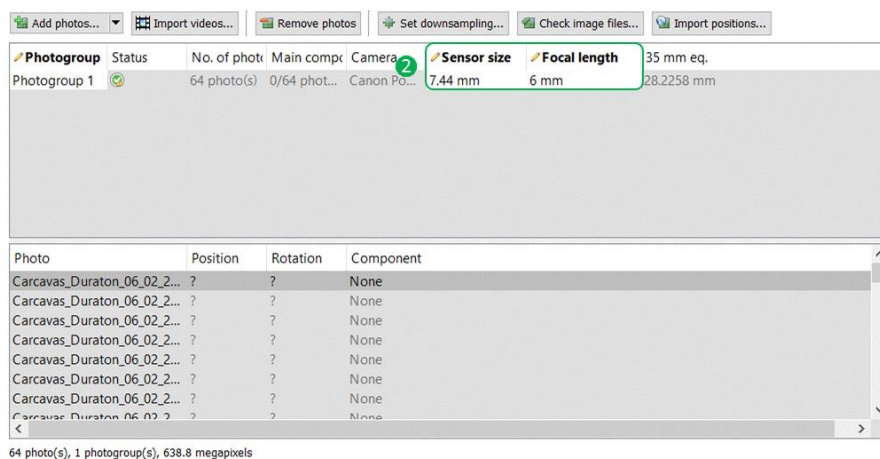


Figura 3.12. Actualización de los parámetros de la cámara utilizada en la toma de fotografías.

El tamaño del sensor de la cámara utilizada en la toma de fotografías es de 7.44 x 5.58 mm. *ContextCapture* en su manual de usuario indica que el tamaño del sensor que debemos introducir es la dimensión más grande del sensor, en nuestro caso 7.44 mm. Al introducir ese valor la longitud focal se calcula automáticamente.

Especificación de los puntos de control

Antes de pasar a la siguiente fase se indican los puntos de control “*Control Points*”. Estos puntos nos permitirán georreferenciar el modelo y coincidirán con la posición de cada una de las estacas/varillas existentes. En todas las fotografías se sitúan en la misma posición.

El proceso consiste en seleccionar las fotografías más características donde aparecen los puntos de control (en este caso, las tres estacas). Para un mismo punto de control se utilizarán varias fotografías, en nuestro caso hemos utilizado 3 para cada uno de los puntos de control.

Antes de comenzar la selección de fotos debemos indicar el Sistema de Referencia de Coordenadas que presentan los puntos de control que posteriormente seleccionaremos. El Sistema de Referencia de Coordenadas utilizado es WGS89 UTM 30N.

Tras encontrar la fotografía deseada y la zona donde se localiza cada estaca debemos marcar el punto exacto haciendo clic en esa zona. Todos los puntos marcados se encuentran en la base de la estaca. Aparece un aspa roja e introducimos las coordenadas obtenidas en campo para esa estaca. Realizamos el mismo proceso con los dos puntos de control restantes (Figura 3.13). También es posible importar un fichero que contenga dichas coordenadas en lugar de introducir los valores manualmente.

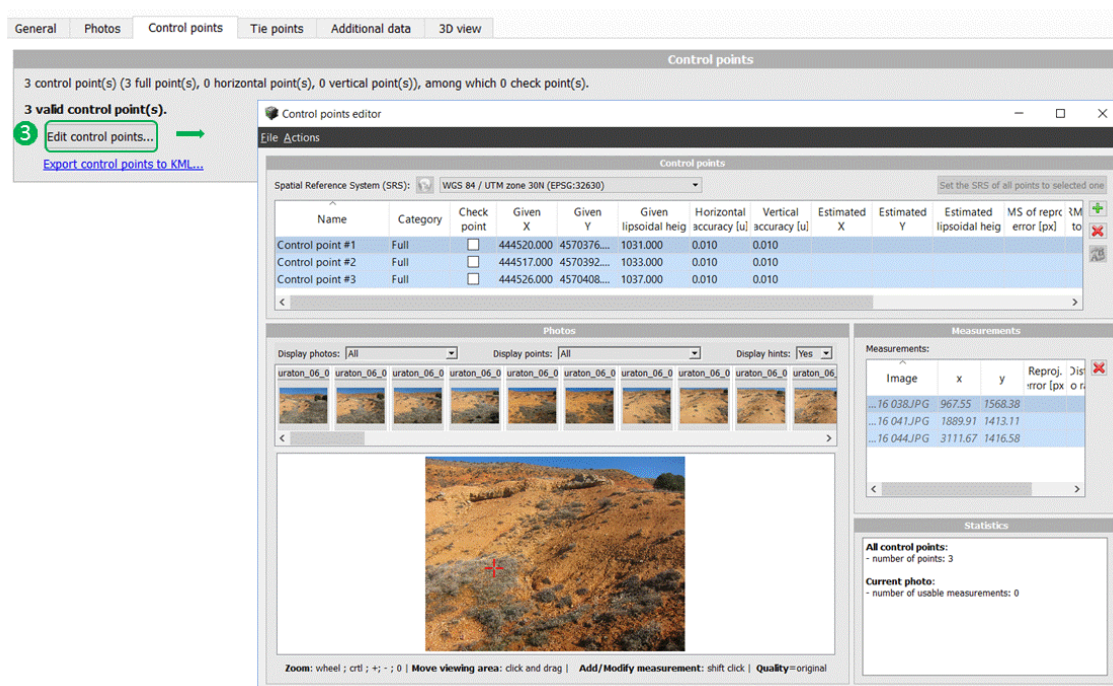


Figura 3.13. Edición de los puntos de control e introducción de las coordenadas de los mismos.

Este paso es uno de los más importantes de todo el proceso ya que al relacionar las fotografías con un sistema de referencia y asociar unas coordenadas podemos obtener productos georreferenciados.

Fase 3 → Aerotriangulación

La triangulación aérea comienza a partir de un bloque inicial, y produce un nuevo bloque con propiedades calculadas o ajustadas según los parámetros de entrada marcados. Este proceso tiene en cuenta los puntos de solape indicados en la fase anterior y realiza los cálculos en función de estos parámetros.

El proceso seguido por *ContextCapture* consiste en (Figura 3. 14):

- Selección de las fotografías que van a participar.
- Posición y orientación del bloque.
- Elección de los métodos de aerotriangulación y herramientas avanzadas.
- Desarrollo del proceso.

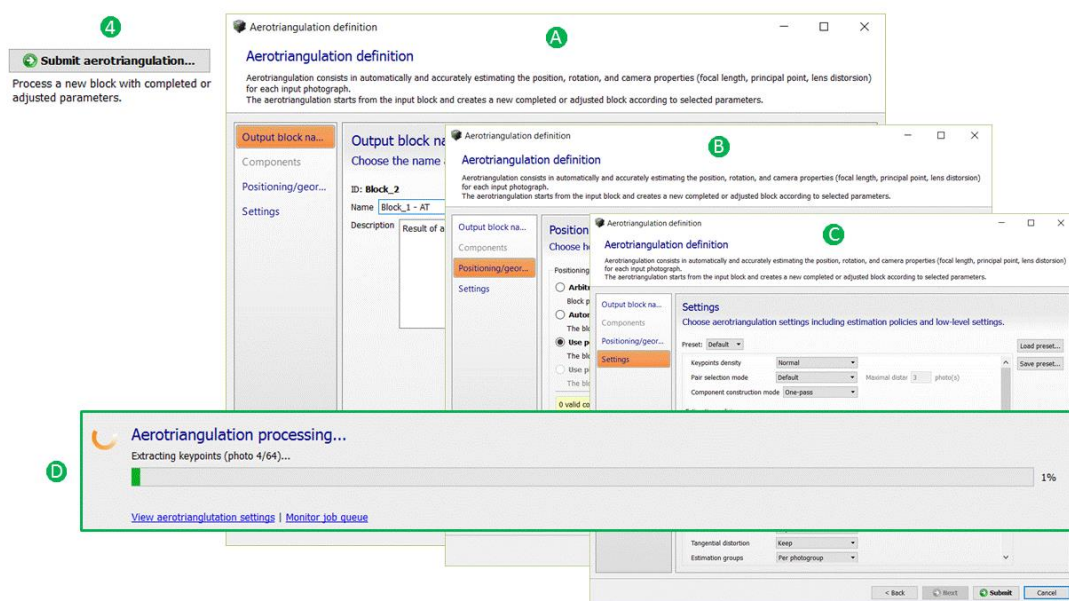


Figura 3.14. Proceso de aerotriangulación aérea marcado por ContextCapture.

Todas las fotografías que se han introducido han sido utilizadas para el proceso de aerotriangulación. Se han utilizado los puntos de control marcados en las fases anteriores y se han establecido los ajustes iniciales marcados por el software.

Tras el proceso de aerotriangulación se muestra un resumen de los parámetros empleados, así como el error medio cuadrático obtenido para el modelo y cada uno de los puntos de control de las fotografías (Figura 3.15).

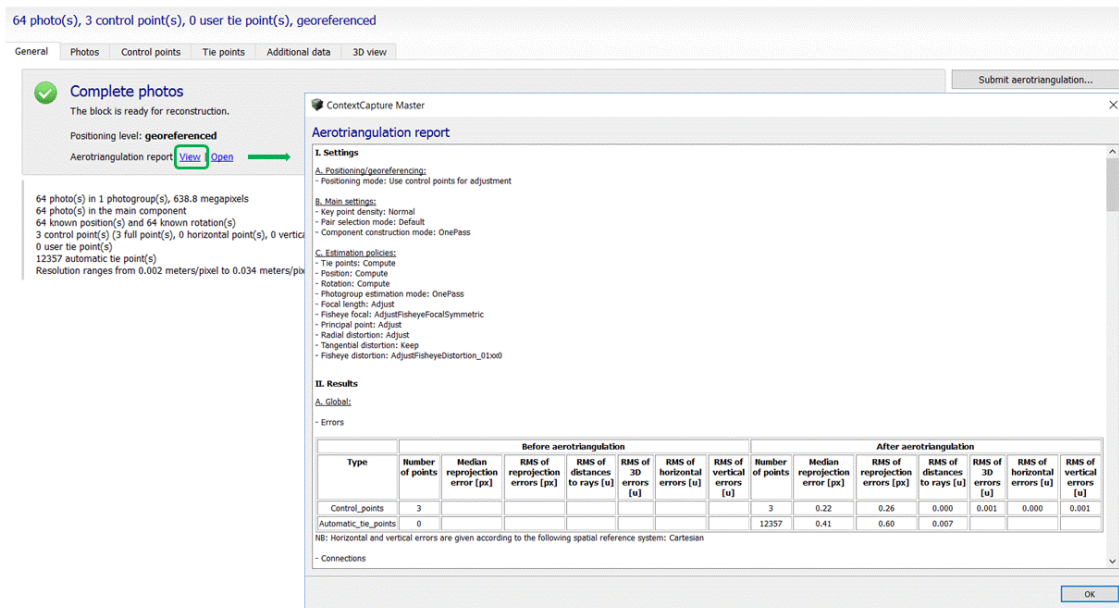


Figura 3.15. Parámetros obtenidos como resultado del proceso de aerotriangulación, entre ellos el RMSE.

También es posible ver las fotografías empleadas, los puntos de control, puntos de unión o de enlace comunes entre cada fotografía y generados automáticamente (*Tie Poits*) y un modelo 3D con la posición exacta de cada una de las fotografías y el campo de visión que abarca cada una (Figura 3.16).

Al hacer clic sobre una foto aparece representada en la ventana lateral derecha cada una de sus características junto con sus coordenadas. Es posible ver también la imagen a mayor tamaño (Figura 3.16).

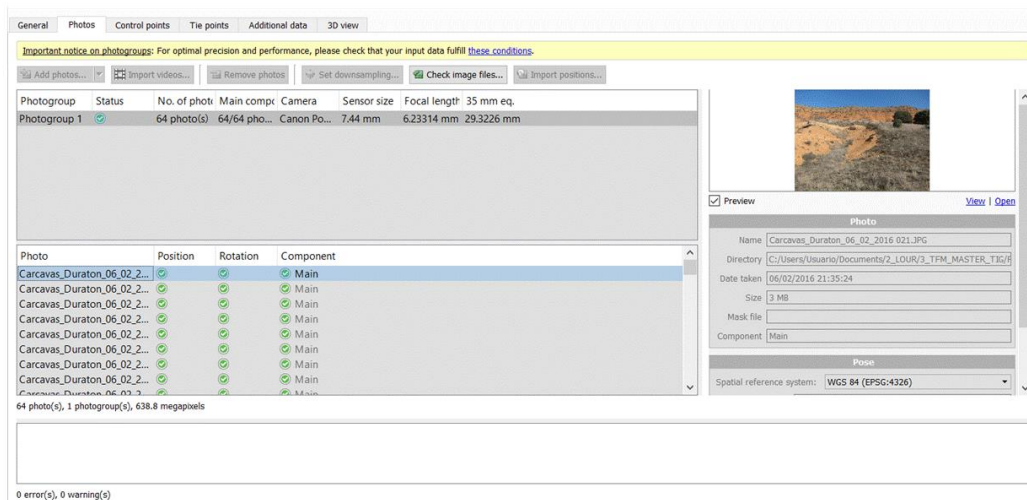


Figura 3.16. Parámetros de las fotografías obtenidos después del proceso de aerotriangulación.

En la pestaña “Control Points” es posible visualizar la posición de los puntos de control establecidos previamente (Figura 3.17).

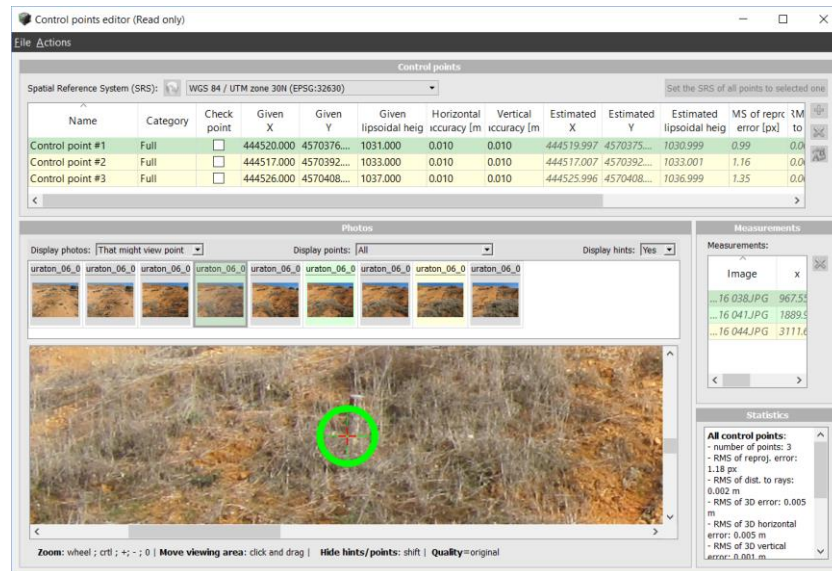


Figura 3.17. Parámetros de los puntos de control obtenidos después del proceso de aerotriangulación.

En la pestaña “3D View” queda representada la posición, rotación y el campo de visión de las fotos empleadas y la posición 3D y el color de los puntos de amarre o enlace (Tie Points).

Al seleccionar una fotografía se marca el campo de visión de la misma (Figura 3.18).

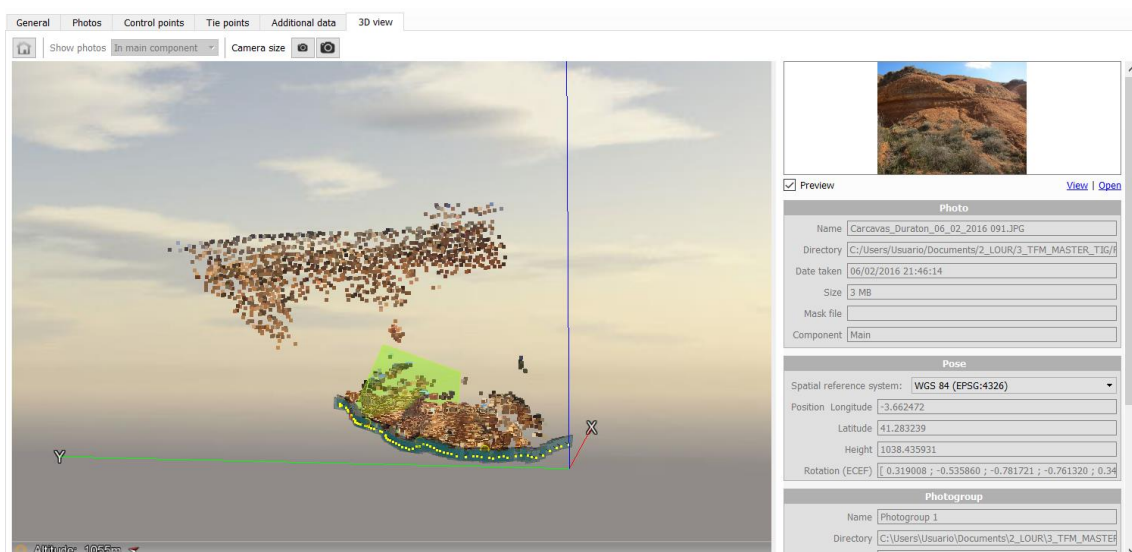


Figura 3.18. Posición y campo visual de cada una de las fotografías que fueron utilizadas durante el proceso de triangulación.

Fase 4 → Ajustes de Reconstrucción

Antes de comenzar con el proceso de Producción se deben establecer los Ajustes de Reconstrucción, estos ajustes se relacionan con el sistema de referencia espacial, las regiones de interés y los retoques o los ajustes de procesamiento como se muestra en la Fig. 3.19.

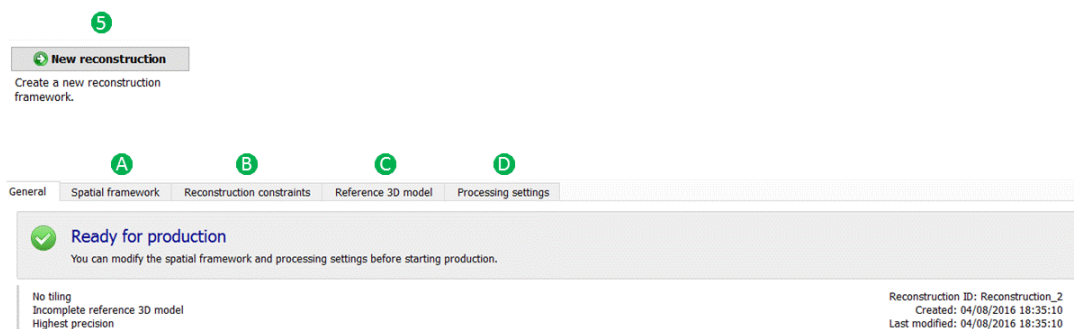


Figura 3.19. Ajustes de reconstrucción marcados por ContextCapture.

El proceso seguido por *ContextCapture* (Figura 3.19) consiste en:

- A. Ajuste del sistema del marco espacial.
- B. Definición de las restricciones de reconstrucción en el caso de existir datos 3D previos.
- C. Gestión del modelo 3D.
- D. Ajuste de los parámetros de procesamiento.

Durante esta etapa se modificó el marco espacial del modelo, acotándose el bloque de producción a la zona donde aparece el talud. Este paso es necesario debido a que inicialmente se generan muchos puntos que no forman parte del área estudiada e incluir estos puntos dentro del proceso de producción da lugar a modelos menos precisos.

Los ajustes se realizaron de forma manual a partir de los botones de edición del marco espacial (Figura 3.20). Las dimensiones finales, así como las coordenadas del bloque (X, Y, Z) aparecen marcadas dentro del apartado “*Bounding box*”.

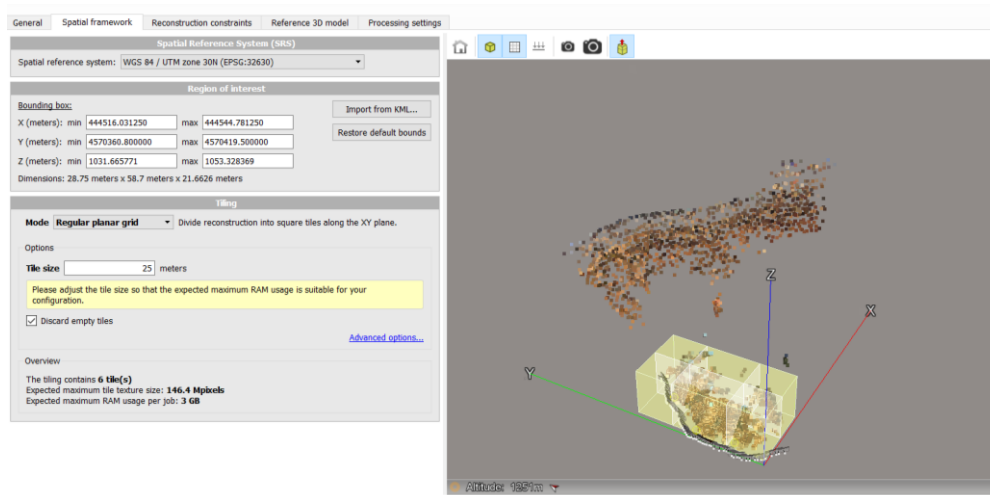


Figura 3.20. Ajuste de la dimensión del bloque de trabajo y división en porciones para mejorar la fluidez del procesado.

ContextCapture nos permite realizar el procesamiento a partir de un único bloque o dividiendo el modelo en un número finito de bloques o baldosas “*Tiling*” en función de las dimensiones iniciales del mismo.

Los modelos utilizados en este proyecto han sido divididos en 6 u 8 “baldosas o mosaicos” durante el ajuste de reconstrucción. Antes de realizar el dimensionado del bloque es necesario marcar el Sistema de Referencia de Coordenadas.

En la pestaña “*Processing Setting*” se establecen los ajustes de precisión geométrica (media, alta o muy alta) y otros ajustes de reconstrucción que modifican el algoritmo en función de las características del conjunto de datos de entrada (Figura 3.21).

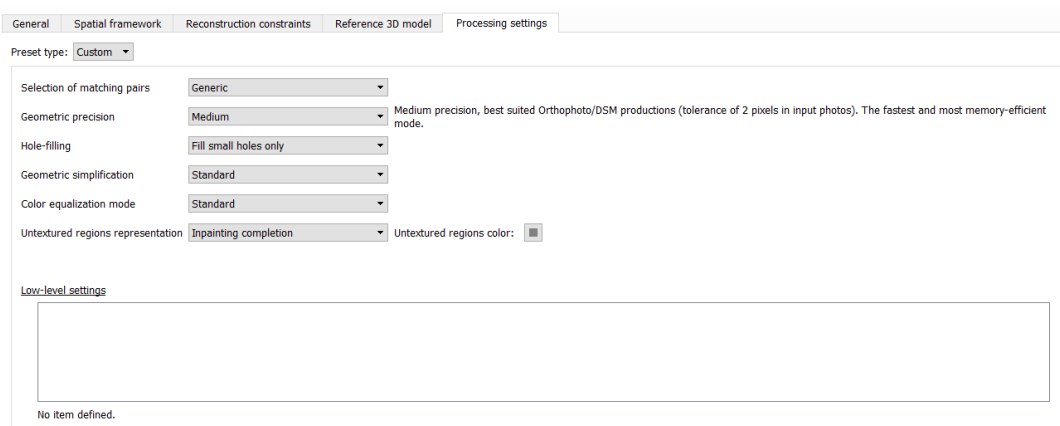


Figura 3.21. Ajuste de los parámetros de reconstrucción.

ContextCapture permite modificar los siguientes parámetros:

- ✓ Selección de pares correspondientes “*Selection of matching pairs*” en función del tipo de fotografías que introducimos inicialmente.
- ✓ Precisión geométrica “*Geometric precisión*” especifica el nivel de tolerancia en las fotos de entrada y se traduce en mayor o menor detalle en el modelo 3D.
- ✓ Llenado de huecos “*Hole-Filling*” controla la modificación de dicho algoritmo.
- ✓ Simplificación geométrica “*Geometric Simplification*”.
- ✓ Modo de ecualización del color “*Color equalization mode*”.
- ✓ Representación de las regiones sin textura “*Untextures regions representation*” en función de los vecinos más próximos.

Los modelos obtenidos para este proyecto se han realizado a partir de los ajustes marcados en la Figura 3.21

Fase 5 → Producción

En la última fase o etapa de producción, elegiremos los productos finales que queremos obtener. *ContextCapture* permite distintos formatos y opciones de salida en función de las propiedades de reconstrucción y del tipo de producción.

El proceso de producción seguido por *ContextCapture* (Figura 3.22) consiste en:

- A. Nombrar el archivo de salida.
- B. Elección del tipo de producción a realizar y del tipo de formato final en función de la producción marcada.

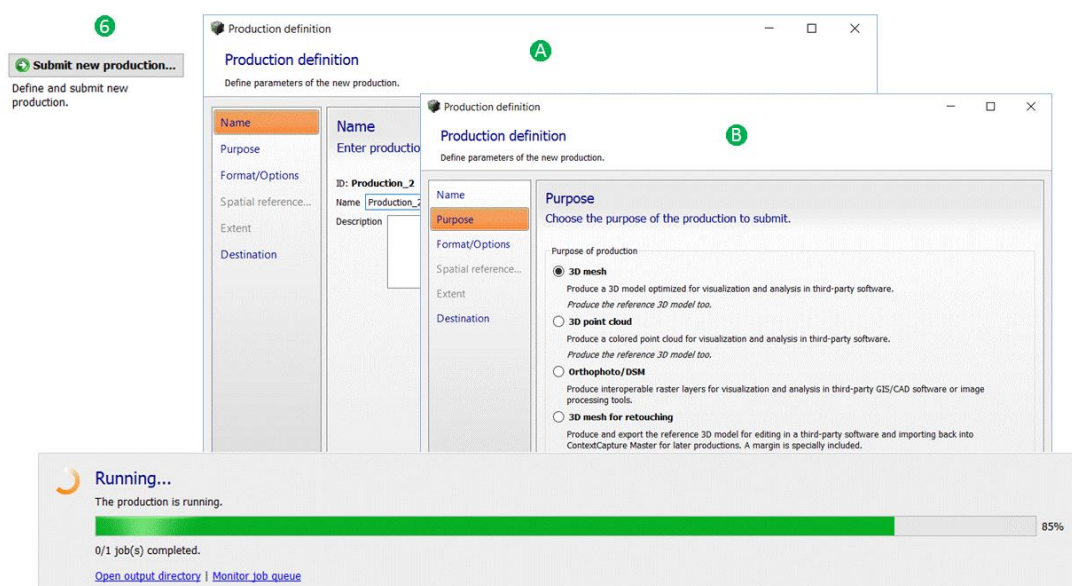


Figura 3.22. Proceso de Producción marcado por *ContextCapture*.

Existen multitud de formatos posibles para los productos. En la figura siguiente (Figura 3.23) se muestra un amplio resumen de los mismos.

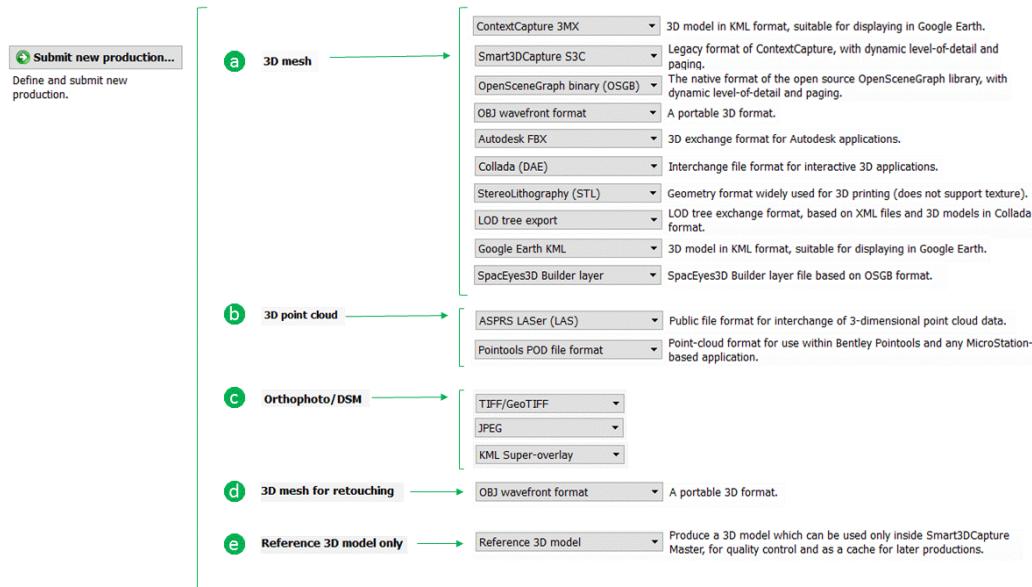


Figura 3.23. Formatos posibles para los productos obtenidos con ContextCapture.

Tras establecer las selecciones necesarias comienza el proceso de producción. Los resultados aparecen en el directorio de salida seleccionado tan pronto como se procesan.

Al hacer clic sobre cada uno de los productos obtenidos podemos ver si está completamente procesado ese producto, un resumen de sus propiedades más importantes y una vista 3D con el resultado (Figura 3.24).

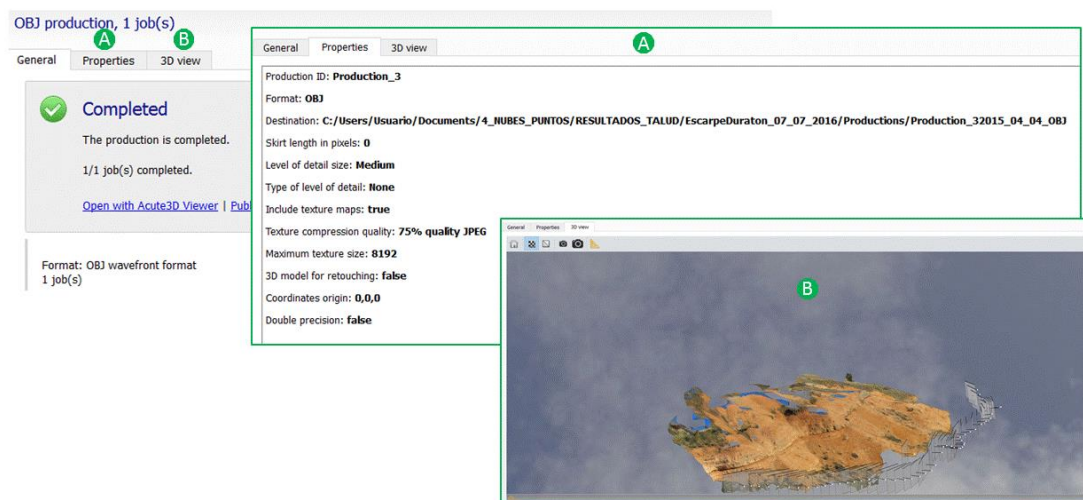


Figura 3.24. Propiedades más significativas de los productos OBJ obtenidos mediante ContextCapture.

La pestaña 3D view proporciona una vista 3D con el resultado de la producción junto con la posición de cada una de las fotografías que han participado en el proceso (Figura 3.25). Es posible cambiar el formato de visualización para ver la malla, el tamaño de las fotografías o realizar mediciones de longitud, volumen, superficie o coordenadas.

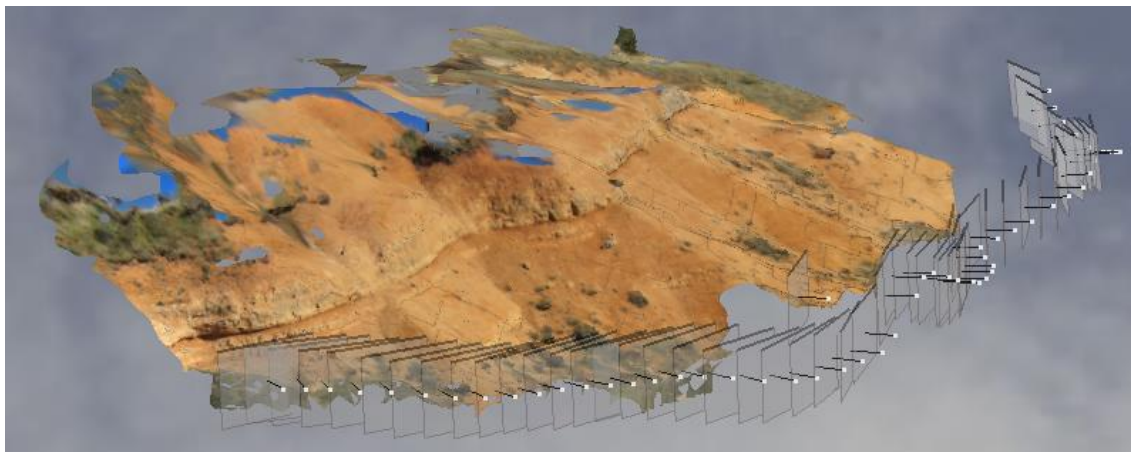


Figura 3.25. Visualización 3D de los productos obtenidos mediante ContextCapture.

Esta vista no está activa con todos los productos.

Es posible ver determinados productos con el visor *Acute3D Viewer*, haciendo clic sobre *Open with Acute3D Viewer* (Figura 3.26). Este visor nos proporciona las mismas opciones de visualización que el visor del propio programa, así como opciones nuevas. En este caso se visualiza el producto final sin la posibilidad de visualización de la posición de las fotografías que participaron en el proceso.

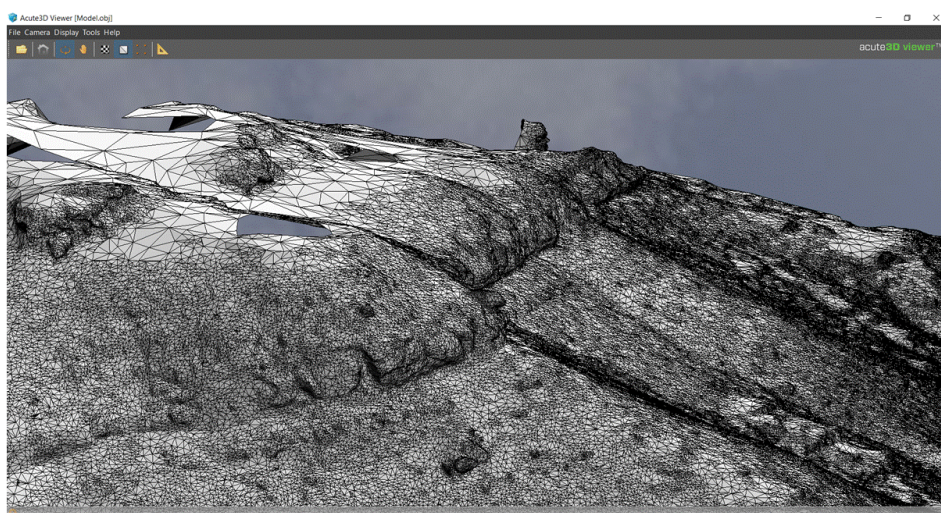


Figura 3.26. Visualización 3D de los productos obtenidos mediante Acute 3D Viewer.



Las imperfecciones que presenta el talud pueden ser modificadas o eliminadas a partir de la generación de un modelo 3D Mesh “*3D Mesh for retouching*” con extensión OBJ.

Es posible modificar únicamente un bloque del modelo o modificar varios bloques dentro de un mismo modelo. El proceso de modificación se realiza sobre *Bentley Descartes*.

4 RESULTADOS

Como resultado de la metodología anterior se obtuvieron diferentes productos cartográficos. De entre ellos destacamos los Modelos Digitales de Superficie cuyo tratamiento nos servirá para realizar la evaluación de la dinámica de los distintos procesos geomorfológicos a lo largo del talud de estudio durante el intervalo temporal analizado.

Los Modelos Digitales de Superficie (Digital Surface Model, DSM) representan la superficie, incluyendo los objetos sobre la misma (vegetación, edificios, etc.). Estos ficheros de tipo ráster con información de georreferenciación se almacenan en formato TIFF/ GeoTIFF.

Las diferencias más notables existentes entre un DSM y un Modelo Digital de Elevaciones (Digital Elevation Model, DEM) estriban en:

- Un DEM es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo.
- Un DSM representa la superficie de la tierra, incluyendo todos los objetos sobre la misma.

Con el fin de evitar las zonas más vegetadas presentes a lo largo del talud los DSMs obtenidos fueron sometidos a un tratamiento previo a su comparación. A lo largo de este apartado se detallan cada uno de los pasos seguidos, así como los resultados obtenidos en la monitorización de los procesos erosivos-sedimentarios.

4.1 RESOLUCIÓN Y PRECISIÓN O CALIDAD DE LOS DSMs

El nivel de detalle del modelo ráster depende de la resolución espacial o tamaño de la celda (píxel). Una mayor resolución espacial implica que hay más celdas por área unidad. La celda debe ser lo suficientemente pequeña para capturar el detalle necesario y lo suficientemente grande para realizar el análisis y el almacenamiento en el equipo de manera eficiente.

Los DSMs obtenidos se han realizado a la resolución y tamaño de celdas establecidos por el programa. ContextCapture establece estos parámetros en función de la geometría del modelo 3D que utiliza para generar los modelos de superficie. Para los modelos obtenidos los tamaños de celda se encuentran en valores de 0,0039 m para el modelo con fecha 6 de febrero de 2016; 0,0052 m para el modelo DSM con fecha 19 de septiembre de 2015 y 0,0063 m para el modelo con fecha 27 de agosto de 2014. Estos tamaños corresponden a celdas muy pequeñas, por tanto, se trata de DSMs que presentan un gran detalle con una representación de un mayor número de entidades de pequeño tamaño. En la tabla que aparece a continuación se muestra un resumen de estos valores de celda (Tabla IV).



Tabla IV. Tamaño de celda que presentan cada uno de los modelos obtenidos.

Escarpe Duratón 06/02/2016_	Cell size (x,y) = 0.0039 m
Escarpe Duratón 19/09/2015_	Cell size (x,y) = 0.0052 m
Escarpe Duratón 27/08/2014_	Cell size (x,y) = 0.0063 m

Un ráster se puede remuestrear para tener un tamaño de celda más grande, sin embargo, no se obtendrá un mayor detalle si se remuestrea un ráster para obtener un tamaño de celda más pequeño. Por este motivo y con el fin de unificar los valores de celda de los archivos ráster que se utilizaron en la monitorización, se han remuestreado todos los ficheros ráster que serán utilizados a un tamaño de celda de 0,0063 m que se corresponde al tamaño de celda mayor, por tanto, los ficheros modificados pasarán de tener un tamaño de celda menor a mayor.

Por su parte, la calidad o precisión de la georreferenciación de los modelos viene marcada por el error medio cuadrático o suma cuadrática media (RMS) que se obtiene a partir de la suma de todos los errores residuales (diferencia entre donde terminó el punto de partida, frente a la ubicación real especificada). El programa *ContextCapture* facilita este parámetro después del proceso de triangulación en pixels. Para los modelos de estudio los errores obtenidos se muestran en la tabla V que aparece a continuación, en una columna aparecen los valores en pixels y en otra columna transformados en mm.

Tabla V. Error medio cuadrático obtenido después del proceso de triangulación en *ContextCapture*.

	RMS (en pixels)	RMS (en mm)
Escarpe Duratón 06/02/2016	0.26	0.069
Escarpe Duratón 19/09/2015	1.60	0.42
Escarpe Duratón 27/08/2014	1.19	0.31

Como se puede observar, los valores de RMS obtenidos son muy bajos, por tanto, podemos pensar que la georreferenciación se ha realizado de forma muy precisa, aunque pueden existir errores debidos a la introducción poco precisa de algún punto de control. Debemos tener este dato en cuenta a la hora de realizar la monitorización y análisis de los procesos geomorfológicos.

4.2 TRATAMIENTO DE LOS DSMs

Los Modelos de Superficie (DSM) obtenidos aparecen divididos en varios *tiles* o baldosas. Para cada una de las fechas de comparación se obtuvieron los ficheros que aparecen en la tabla VI que se muestra a continuación.

Tabla VI. Ficheros que componen cada uno de los Modelos de Superficie obtenidos.

Fecha adquisición	Número de tiles	Número de ficheros	Nombre de los ficheros obtenidos
06/02/2016	15	15	20160206_ED_G_DSM_part_1_1.tiff 20160206_ED_G_DSM_part_1_2.tiff 20160206_ED_G_DSM_part_1_3.tiff 20160206_ED_G_DSM_part_2_1.tiff 20160206_ED_G_DSM_part_2_2.tiff 20160206_ED_G_DSM_part_2_3.tiff 20160206_ED_G_DSM_part_3_1.tiff 20160206_ED_G_DSM_part_3_2.tiff 20160206_ED_G_DSM_part_3_3.tiff 20160206_ED_G_DSM_part_4_1.tiff 20160206_ED_G_DSM_part_4_2.tiff 20160206_ED_G_DSM_part_4_3.tiff 20160206_ED_G_DSM_part_5_1.tiff 20160206_ED_G_DSM_part_5_2.tiff 20160206_ED_G_DSM_part_5_3.tiff
19/09/2015	6	6	20150919_ED_G_DSM_part_1_1.tiff 20150919_ED_G_DSM_part_1_2.tiff 20150919_ED_G_DSM_part_2_1.tiff 20150919_ED_G_DSM_part_2_2.tiff 20150919_ED_G_DSM_part_3_1.tiff 20150919_ED_G_DSM_part_3_2.tiff 20150919_ED_G_DSM_part_4_1.tiff 20150919_ED_G_DSM_part_4_2.tiff
27/08/2014	8	8	20140827_ED_G_DSM_part_1_1.tiff 20140827_ED_G_DSM_part_1_2.tiff 20140827_ED_G_DSM_part_2_1.tiff 20140827_ED_G_DSM_part_2_2.tiff 20140827_ED_G_DSM_part_3_1.tiff 20140827_ED_G_DSM_part_3_2.tiff

Mediante la herramienta *Mosaic to New Raster* del software ArcGis se realizó la unión en un único fichero de cada uno de los tiles o baldosas generados para cada uno de los modelos de comparación (Figura 4.1).

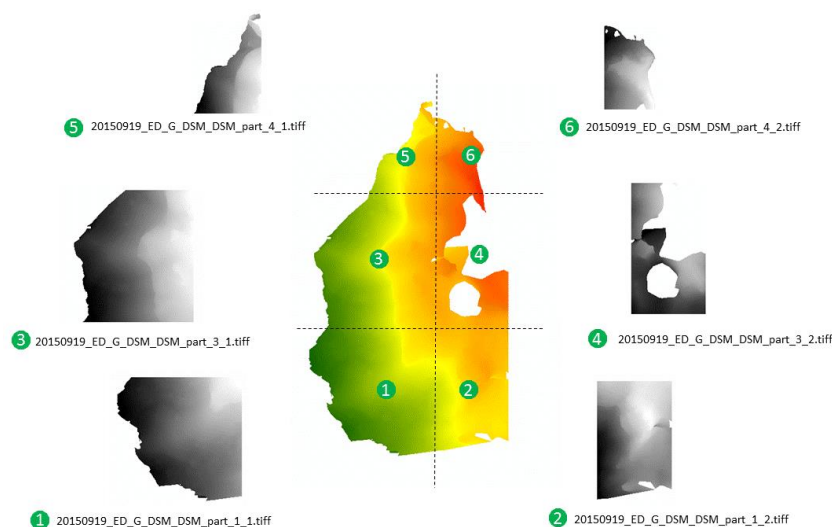


Figura 4.1. Mosaico resultado de la unión de los diferentes ficheros que se obtuvieron del programa ContextCapture para cada una de las fechas de estudio.

Tras obtener cada uno de los mosaicos y con el fin de evitar las irregularidades que presentan los límites de definición de los DSMs, se realizaron máscaras de recorte adaptadas a cada uno de los DSMs del estudio. Estas máscaras delimitan el borde de cada uno de los Modelos y eliminan las áreas irregulares que pueden dar lugar a errores durante el procesado final. El resultado de esta nueva delimitación de zonas se muestra en la Figura 4.2 donde se puede apreciar la diferente delimitación de área establecida para cada uno de los modelos.

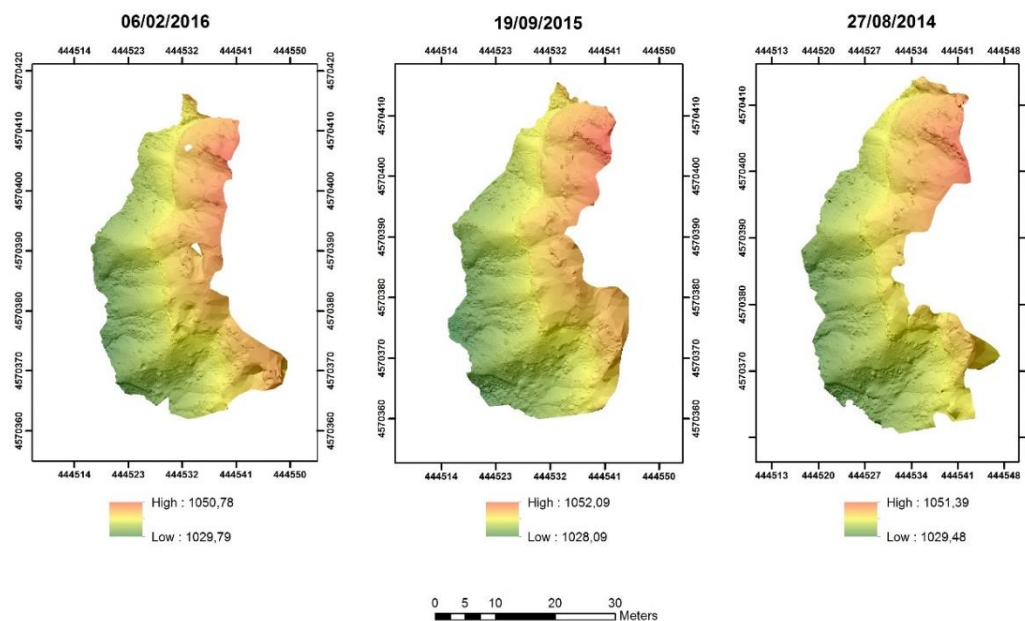


Figura 4.2. Definición del área que delimita cada uno de los DSMs a partir de la eliminación de las zonas de borde más irregulares.

También se preparó una máscara o área de recorte para delimitar las zonas con vegetación y sin vegetación. Esta máscara nos permitirá extraer las zonas más vegetadas de los cálculos y realizar los cálculos de diferencias de elevación sobre las zonas sin vegetación. Esta área es común para todos los modelos y será la superficie que se utilizará para realizar la monitorización de los procesos de erosión y sedimentación para las diferentes fechas de estudio. Las Figuras 4.3, 4.4 y 4.5 muestran la morfología de esta área para cada una de las fechas indicadas en el estudio.

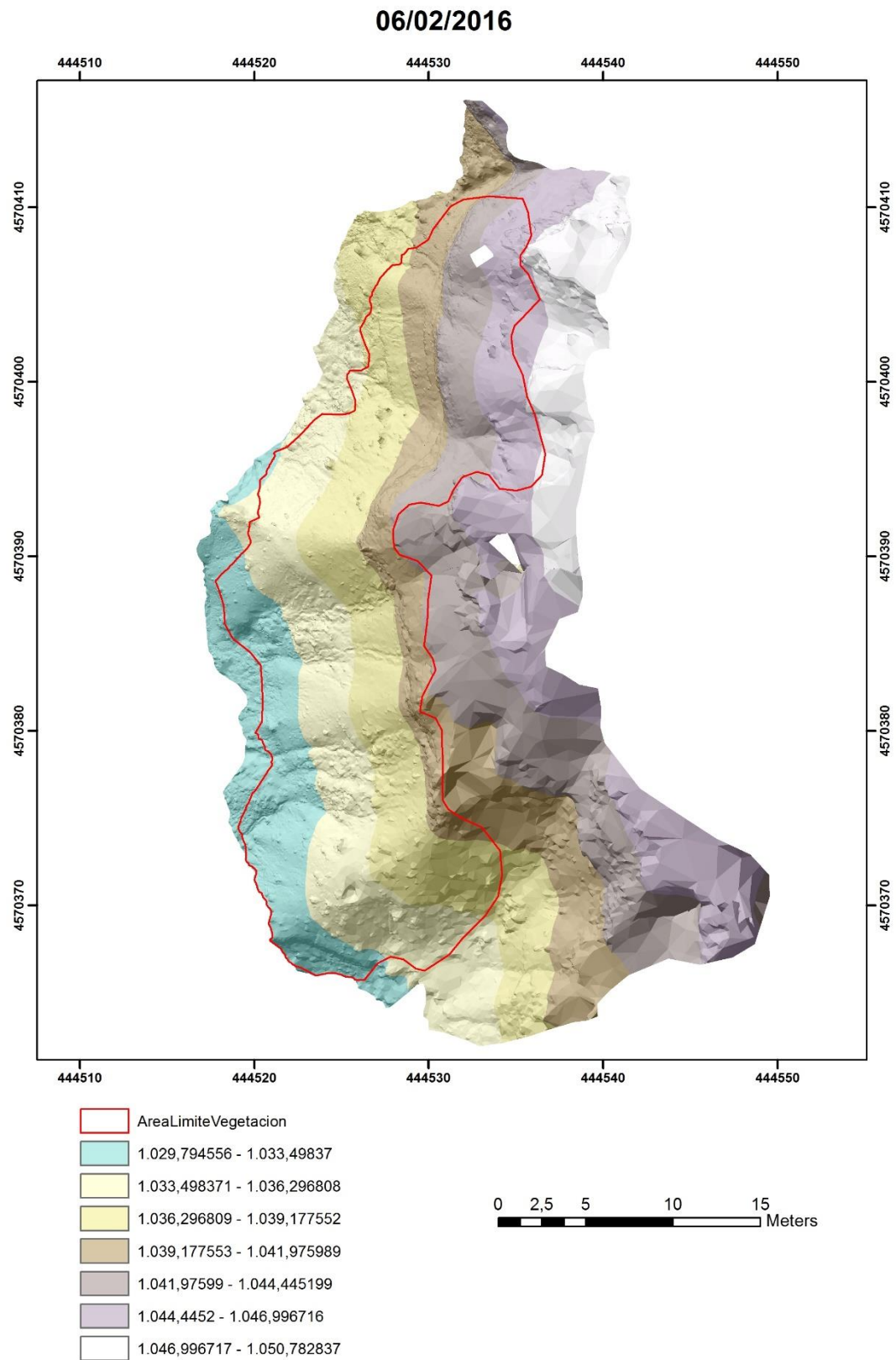


Figura 4.3. Modelo Digital de Superficie con fecha 6 de febrero de 2016 y máscara que delimita las zonas vegetadas de las menos vegetadas (área de cálculo).

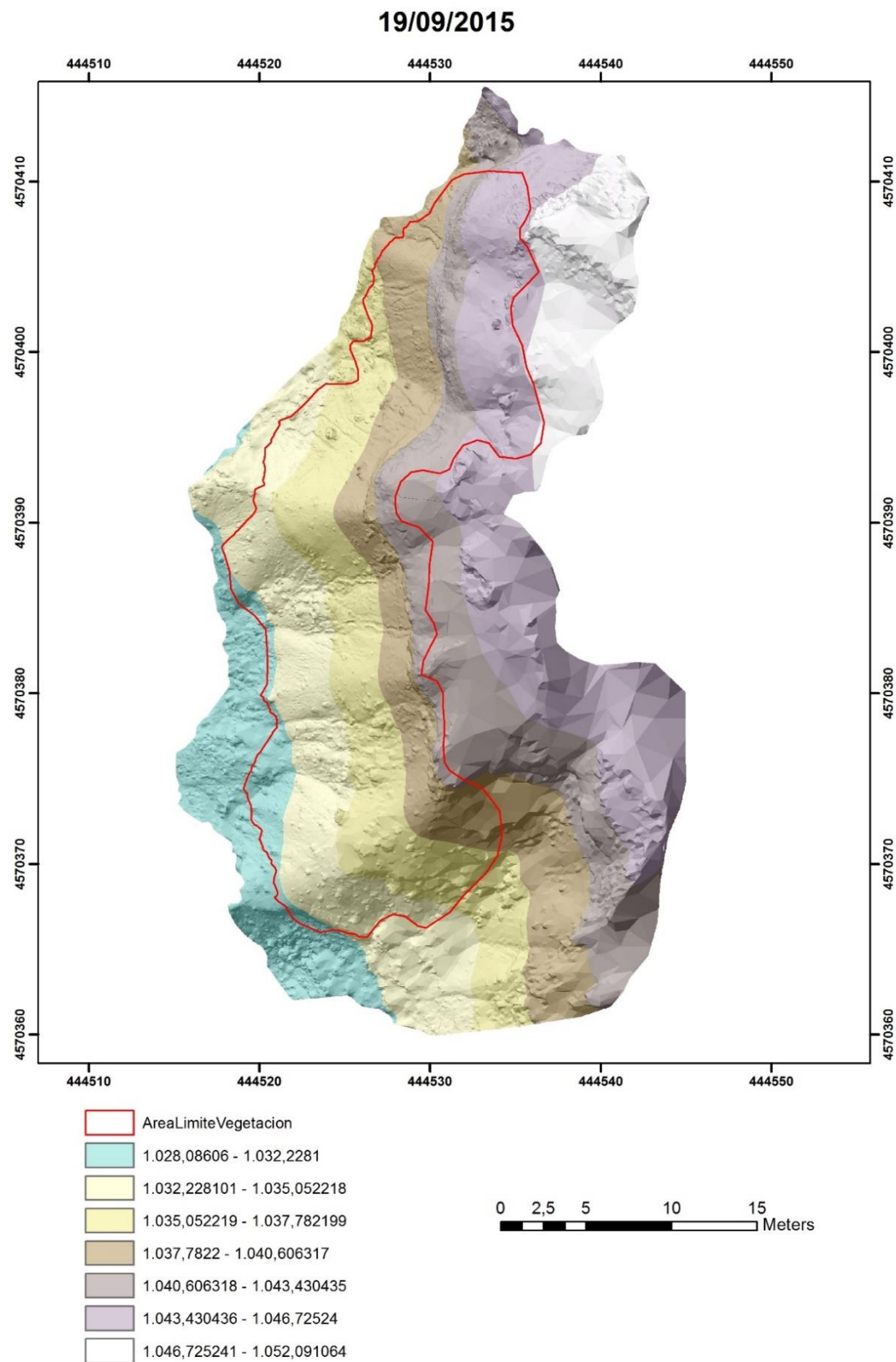


Figura 4.4. Modelo Digital de Superficie con fecha 19 de septiembre de 2015 y máscara que delimita las zonas vegetadas de las menos vegetadas (área de cálculo).

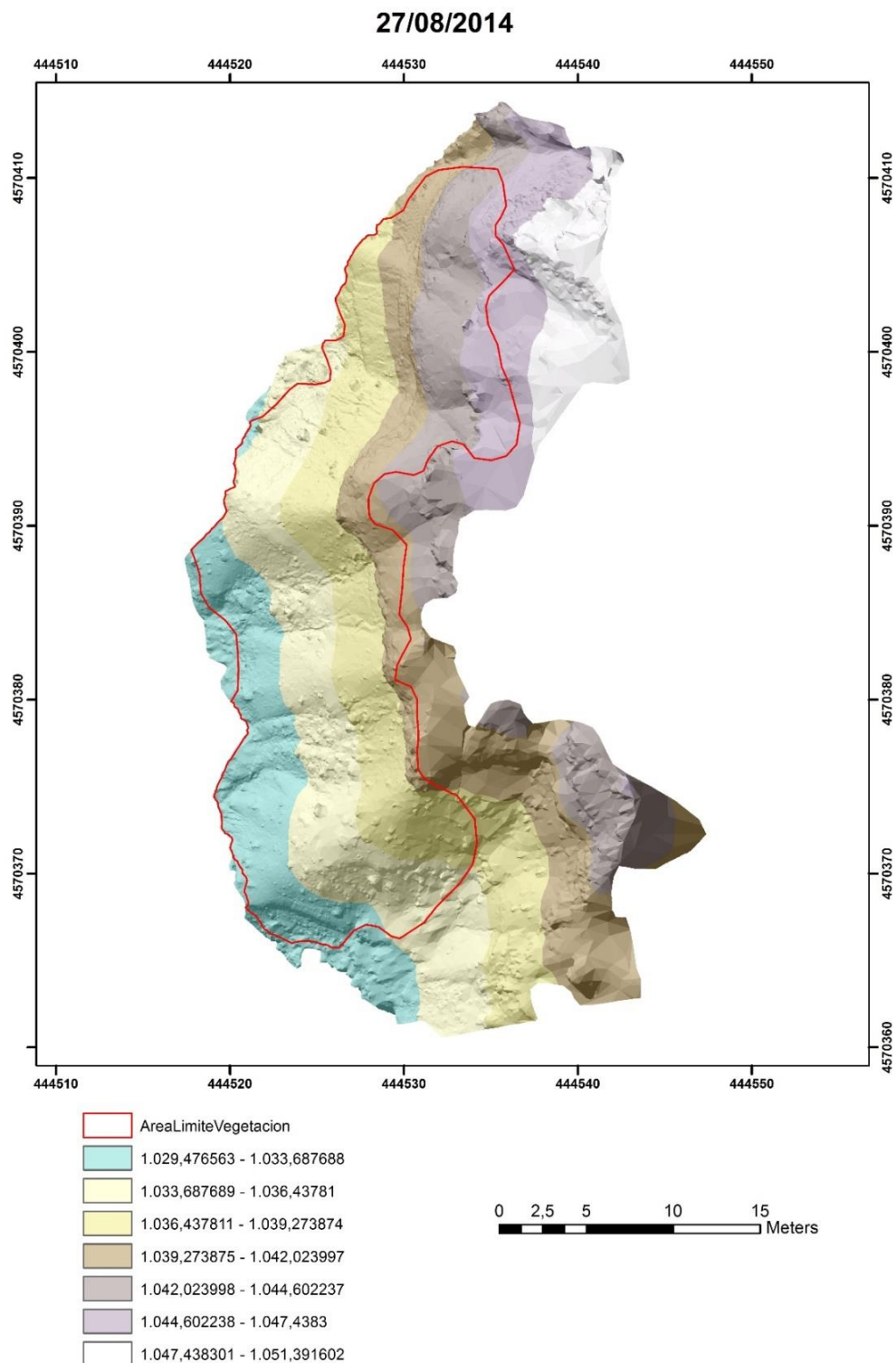


Figura 4.5. Modelo Digital de Superficie con fecha 27 de agosto de 2014 y máscara que delimita las zonas vegetadas de las menos vegetadas (área de cálculo).

4.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS (MODELOS DE DIFERENCIAS, DOD)

Para establecer la comparación de los modelos se realizó la resta del modelo de superficie (DSM) más moderno con fecha 6 de febrero de 2016 con los otros dos DSMs de 19 de septiembre de 2015 y 27 de agosto de 2014. Tras este cálculo se obtuvieron dos nuevos modelos, denominados Modelos de Diferencias de Elevaciones (*Digital Elevation Model of difference*, DoD en su acrónimo en inglés) en los que se pueden detectar los cambios en la superficie entre las diferentes fechas. En estos modelos de diferencias se puede considerar que los valores positivos o superiores a 0 son indicativos de los procesos de sedimentación mientras que los valores negativos o inferiores a 0 muestran los procesos de erosión (Wheaton et al., 2010).

Como paso previo a delimitar las zonas de erosión y sedimentación se calculó el error debido a la distancia de las toma de las fotografías con respecto al objeto fotografiado (error conocido como RPR, ratio de precisión relativa), estimándose según algunos autores valores de RPR en torno a 1:1.000 (James y Robson, 2012), y el error medio cuadrático de la Foto-Reconstrucción (RMSE) cuya suma se tiene en cuenta para discriminar aquellas celdas que estarían dentro del error, tanto negativo como positivo. La suma de ambos errores sería un intervalo de valores comprendido entre -0,00342 y 0,00342. En este caso pocas celdas estarían dentro del error, es decir, no sería posible saber, si existe esa incertidumbre, si la erosión/sedimentación es real o está dentro del margen del error. Únicamente deberíamos considerar cambios en aquellas celdas con valores superiores a 0,68 cm.

RESULTADOS: COMPARACIÓN ESCARPE DESDE EL 19 SEPTIEMBRE DE 2015 HASTA EL 6 DE FEBRERO DE 2016

El periodo de análisis del escarpe que se muestra en este apartado tiene una duración de 7 meses (entre el 19/09/2015 y el 6/02/2016). Para este intervalo de tiempo el modelo de superficie obtenido presenta la mayor parte de sus valores en el intervalo que va de -0,5 a 0,2 lo que indica un predominio de la actividad de tipo erosiva (Figura 4.6).

El volumen de material erosionado es de 253,04 m³ para el área de análisis (462,16 m²). Estos valores indican una erosión de 0,55m³ m⁻² y una tasa de erosión de 1,44 m³ m⁻² a⁻¹ para un intervalo de tiempo de 142 días (0,38 años).

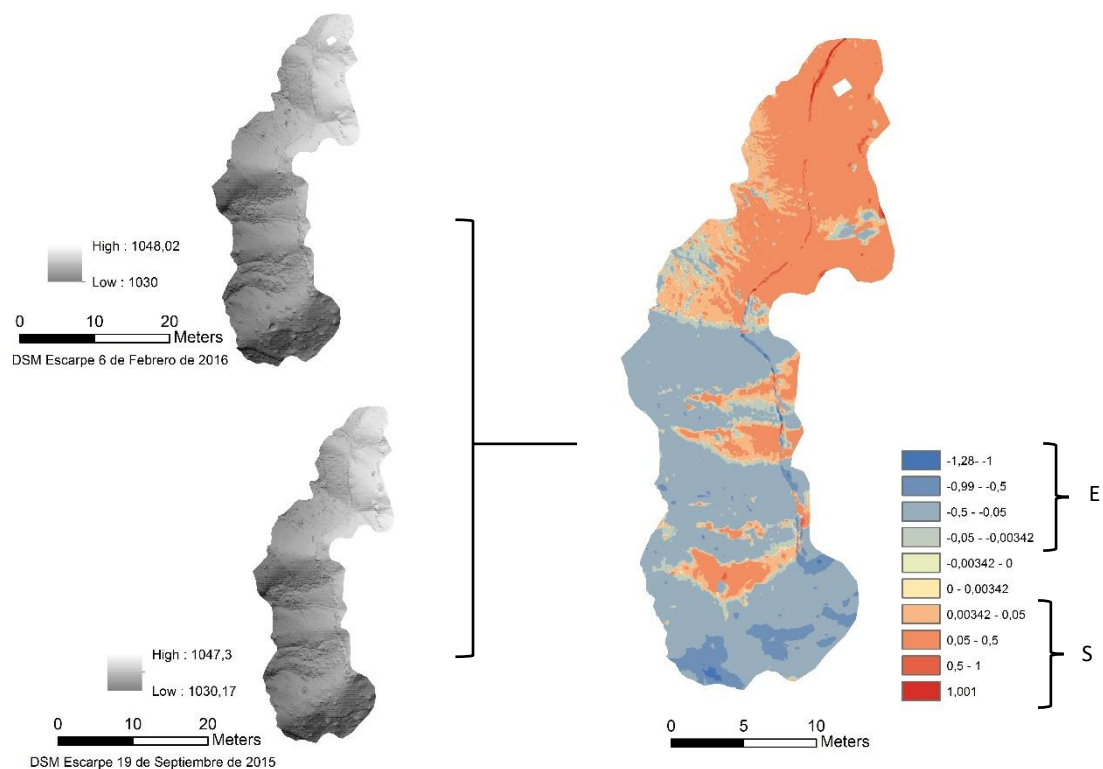


Figura 4.6. Comparación de escarpes desde el 19 de septiembre de 2015 hasta el 6 de febrero de 2016.

“E” = erosión y “S”= sedimentación.

Espacialmente el proceso erosivo muestra una distribución concentrada en la parte derecha y central del talud en torno a bandas dispuestas verticalmente a favor de la pendiente. Estas bandas coinciden con zonas de pendiente cóncava donde la circulación de fluidos es favorable (Figura 4.6).

La distribución de los procesos de erosión/sedimentación tan sistemática a lo largo de estas bandas hace pensar en un periodo de lluvias anterior a la toma de las fotografías que originaría estos surcos o regueros coincidentes con las zonas de erosión del agua y la acumulación de sedimento en las zonas próximas de pendiente más favorable.

A lo largo del talud, en zonas muy concretas, destaca la presencia de valores muy elevados para la erosión/sedimentación.

Si observamos el histograma de clasificación del modelo (Figura 4.7) podemos ver que a lo largo del histograma los valores máximos (superiores a 0,5) y mínimos (inferiores a -1,00) tienen una representación de frecuencias muy escasa, siendo el número de celdas que se sitúan dentro de estos valores tan reducido que tiene muy poca representación en el conjunto global de celdas analizadas.

Estos valores tan elevados nos indican errores en el ajuste durante el proceso de georreferenciación. Estas zonas no se tendrán en cuenta en el análisis de los procesos de erosión y sedimentación.

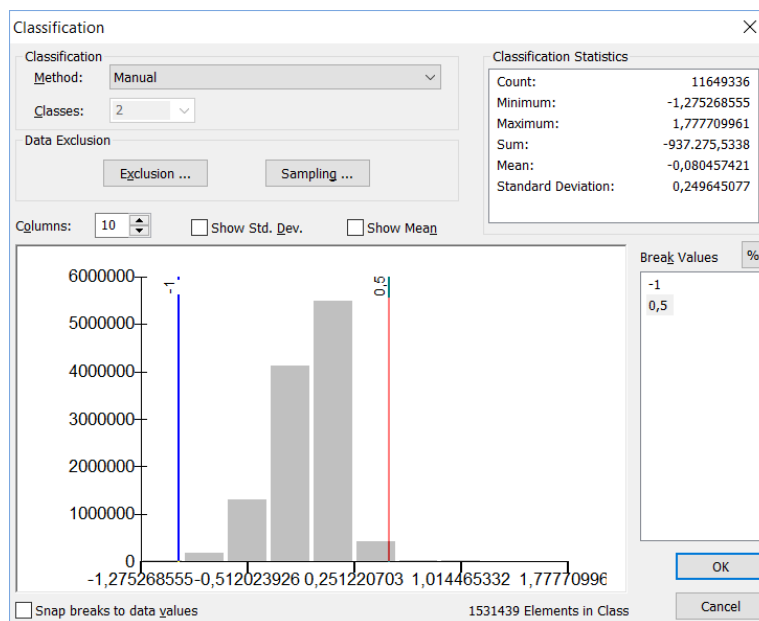


Figura 4.7. Histograma de clasificación del modelo de comparación de escarpes desde el 19 de septiembre de 2015 hasta el 6 de febrero de 2016

Visualmente si realizamos una comparación de las fotografías tomadas para cada uno de los periodos de tiempo analizados, podemos observar en detalle los procesos producidos y comparar éstos con los resultados obtenidos (Figura 4.8).

El proceso de erosión aparece representado en gran parte del talud, generalmente con zonas donde existe la presencia de surcos o regueros que se han ido haciendo cada vez más profundos por el tránsito del agua a través de ellos. Estas zonas se sitúan a media ladera coincidiendo con las zonas de pendiente más cóncava (Figura 4.8, 4.9 y 4.11)

Los procesos de sedimentación tienen poca representación visual al comparar las fotografías de ambas fechas, pero se identifican próximos a zonas deprimidas donde los regueros sedimentan su carga en suspensión o zonas de pendiente más convexa unidas a zonas más pronunciadas (Figura 4.8 y 4.10).

Como combinación de los procesos de erosión / sedimentación se muestra un detalle en la Figura 4.12 cuya posición exacta aparece en la figura 4.8. La arroyada da lugar a pequeños regueros o surcos que se hacen de mayores dimensiones por la escorrentía y concentración del agua, pero cuando el caudal del agua disminuye tienen lugar los procesos de sedimentación dentro de los regueros originando la colmatación de los mismos.

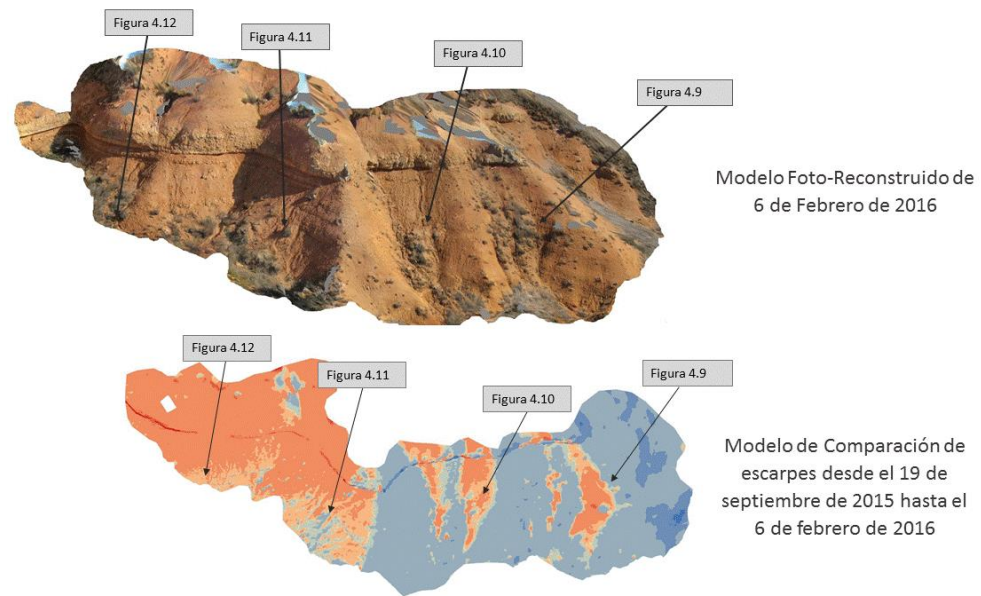


Figura 4.8. Detalle de la posición de cada una de las fotografías como ejemplo de los procesos de erosión y sedimentación producidos a lo largo del tiempo de análisis.

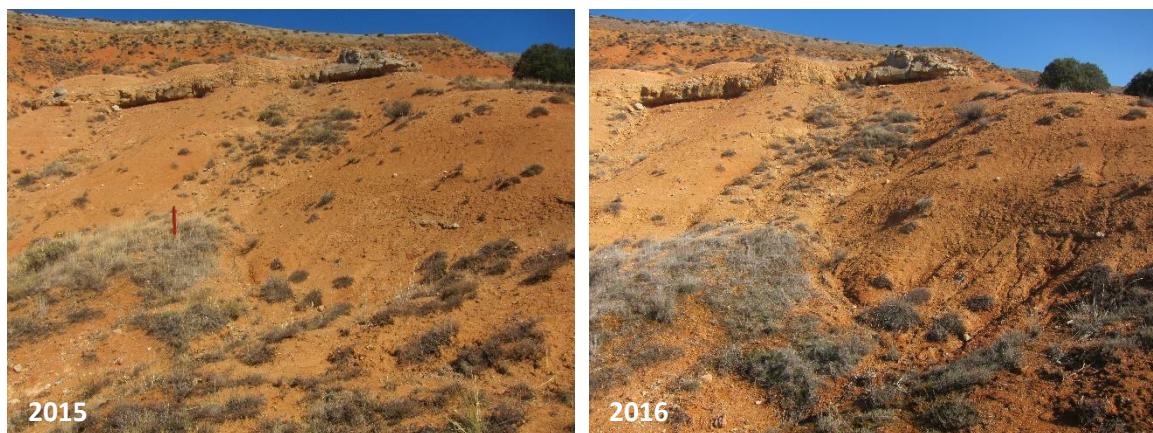


Figura 4.9. Comparación de escarpes desde el 19 de septiembre de 2015 hasta el 6 de febrero de 2016, detalles de los procesos de erosión originando surcos y regueros.



Figura 4.10. Comparación de escarpes desde el 19 de septiembre de 2015 hasta el 6 de febrero de 2016, detalle de la sedimentación como resultado del transporte a favor de la pendiente en mitad de la ladera para este intervalo de tiempo.



Figura 4.11. Comparación de escarpes desde el 19 de septiembre de 2015 hasta el 6 de febrero de 2016, detalle del proceso de erosión con un aumento de la profundidad de los surcos o regueros por los que discurre el agua a lo largo del tiempo.

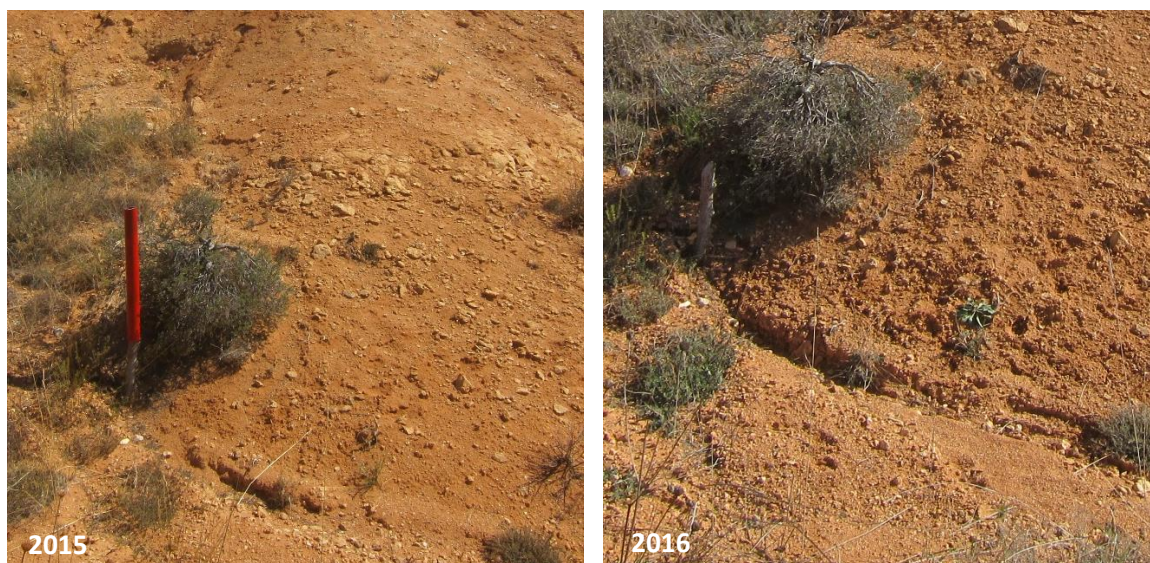


Figura 4.12. Comparación de escarpes desde el 19 de septiembre de 2015 hasta el 6 de febrero de 2016, detalle del proceso de sedimentación a favor de surcos o regueros.

RESULTADOS: COMPARACIÓN ESCARPE DESDE EL 27 AGOSTO DE 2014 HASTA EL 6 DE FEBRERO DE 2016

El periodo de análisis del escarpe que comprende este apartado presenta una duración de 17 meses (entre el 27/08/2014 y el 06/02/2016). Para este intervalo de tiempo el modelo de diferencias de elevación obtenido presenta la mayor parte de sus valores en el intervalo que oscila entre -0,2 y 0,6 lo que indica un predominio de la sedimentación frente a la erosión (Figura 4.8).

El volumen de material erosionado es de 65,61 m³ para el área de análisis (462,16 m²). Estos valores indican una tasa de erosión de 0,057 m³ m⁻²a⁻¹ para un intervalo de tiempo de 496 días (1,36 años). Por el contrario, el volumen de material sedimentado es de 426,79 m³. Para el área de estudio estos valores indican una tasa de sedimentación de 0,68 m³ m⁻²a⁻¹

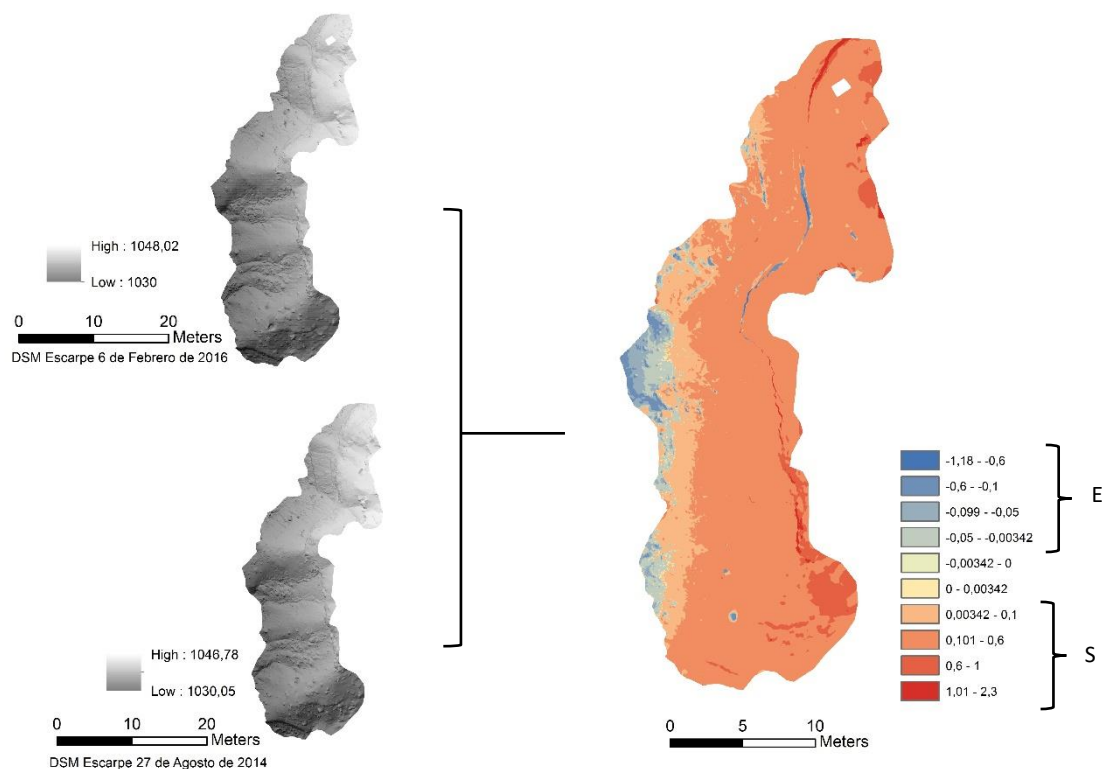


Figura 4.13. Comparación de escarpes desde el 27 de agosto de 2014 hasta el 6 de febrero de 2016.

"E" = erosión y "S" = sedimentación.

Especialmente la sedimentación muestra una amplia distribución a lo largo del escarpe quedando concentrado el proceso de erosión únicamente en las zonas del pie, así como en las zonas más consistentes del talud (Figura 4.13).

En zonas muy concretas a lo largo del talud destaca la presencia de valores muy elevados para la erosión/sedimentación.

Si observamos el histograma de clasificación del modelo (Figura 4.14) podemos ver la representación estadística de estos valores. A lo largo del histograma los valores máximos (superiores a 1,00) y mínimos (inferiores a -0,50) tienen una representación de frecuencias muy escasa, indicativo de que la representación de celdas que se sitúan dentro de estos valores es tan reducida que tienen muy poca representación en el conjunto global de celdas analizadas.

Estos valores tan elevados nos indican errores en el ajuste durante el proceso de georreferenciación. Estas zonas no se tendrán en cuenta en el análisis de los procesos de erosión y sedimentación.

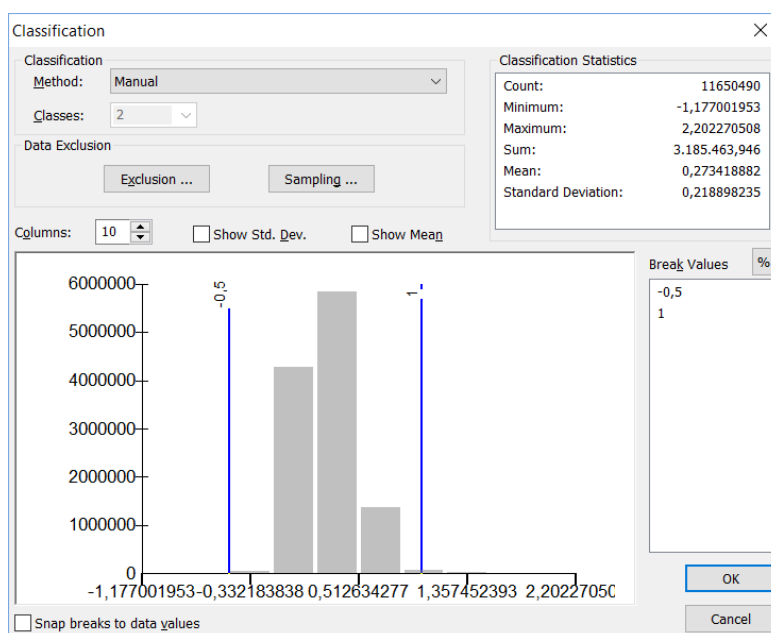


Figura 4.14. Histograma de clasificación del modelo de comparación de escarpes desde el 27 de agosto de 2014 hasta el 6 de febrero de 2016.

Visualmente si realizamos una comparación de las fotografías tomadas para cada uno de los periodos de tiempo analizados, podemos observar en detalle la dinámica geomorfológica y compararla con los resultados obtenidos (Figura 4.15)

El proceso de erosión aparece únicamente en el pie del talud y en zonas intermedias en relación con la erosión de los materiales más competentes. Si analizamos detalladamente las imágenes que nos muestran la pendiente del talud encontramos zonas con procesos erosivos que no han sido marcados en el modelo o presentan muy poca representación en el mismo (Figura 4.15 y 4.16). Estas zonas se caracterizan por presentar regueros muy marcados por los que la circulación de agua a favor de la pendiente dando lugar a los procesos erosivos.

Sin embargo, en otras zonas (Figura.4.15 y 4.19) los procesos erosivos aparecen menos acusados si comparamos ambos periodos de tiempo, produciéndose una mayor uniformidad

del relieve y desapareciendo los regueros que inicialmente presentaba el escarpe. Estas zonas se corresponden con las zonas de tránsito entre los procesos de erosión/sedimentación que aparecen indicadas en el talud (Figura.4.8).

Los procesos de sedimentación apenas pueden visualizarse en la comparación de imágenes excepto en aquellas zonas donde pequeños bloques desprendidos presentan un abultado tamaño para su identificación visual (Figura 4.15 y 4.17).

En las Figuras 4.15, 4.18 y 4.20 el proceso de erosión del material más competente como resultado de posibles episodios de hielo- deshielo, originaría la descamación del pequeño escarpe que se acumularía a favor de la pendiente más próxima a esas zonas. En estos casos podríamos identificar tanto el proceso erosivo como el sedimentario y ambos procesos aparecen en el modelo de diferencias (Figura 4.15 y 4.13).

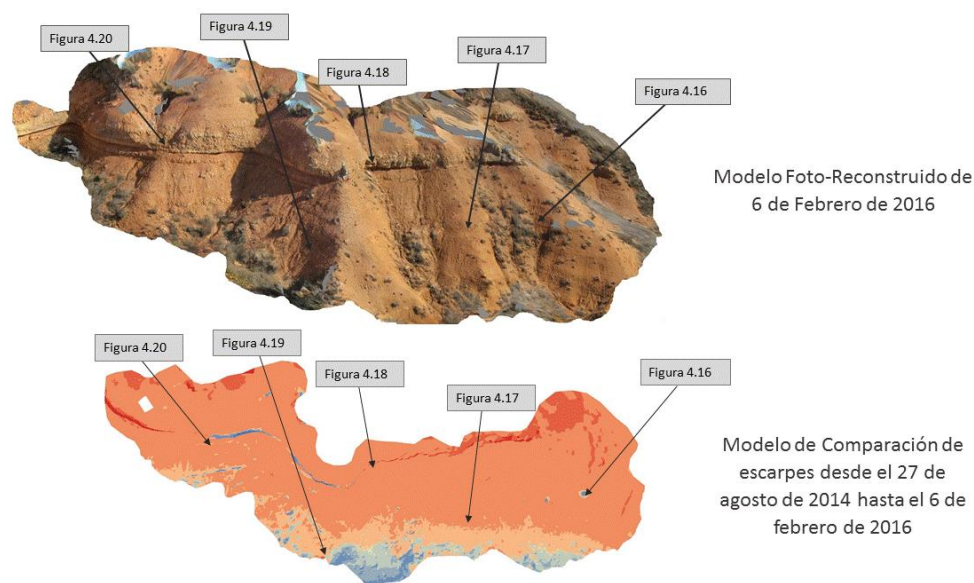


Figura 4.15. Detalle de la posición de cada una de las fotografías como ejemplo de los procesos de erosión y sedimentación producidos a lo largo del tiempo de análisis.

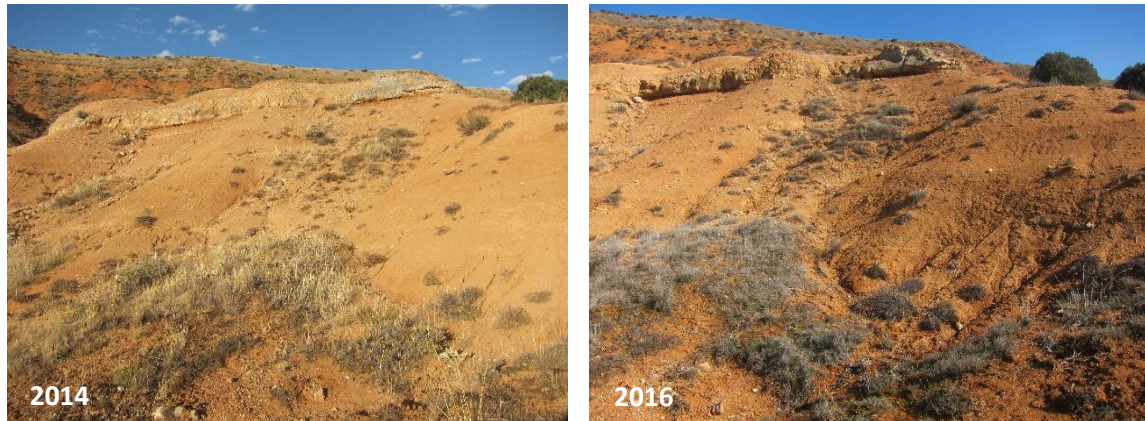


Figura 4.16. Comparación de escarpes desde el 27 de agosto de 2014 hasta el 6 de febrero de 2016, detalle de los procesos erosivos producidos a lo largo del tiempo.

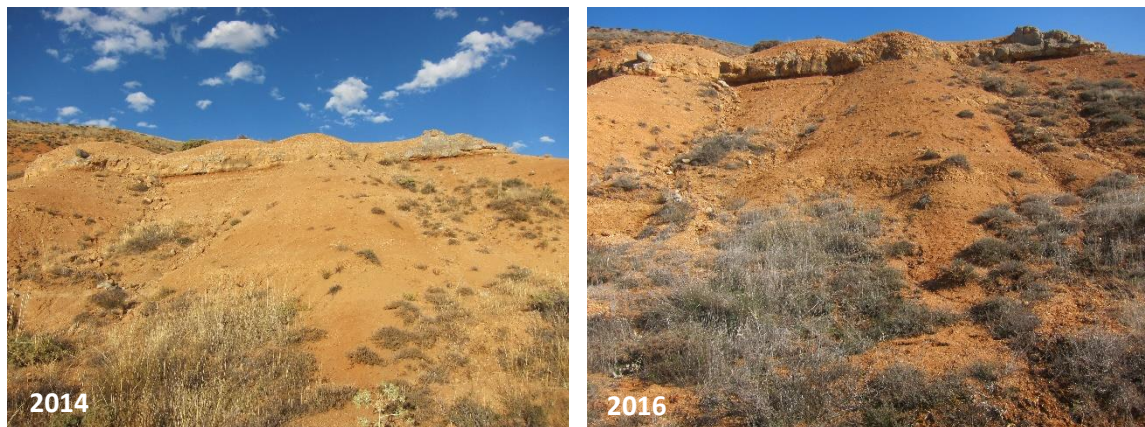


Figura 4.17. Comparación de escarpes desde el 27 de agosto de 2014 hasta el 6 de febrero de 2016, detalle de la sedimentación producida a media ladera para este intervalo de tiempo.



Figura 4.18. Comparación de escarpes desde el 27 de agosto de 2014 hasta el 6 de febrero de 2016, detalle de los procesos de erosión de material más competente y sedimentación del material erosionado.

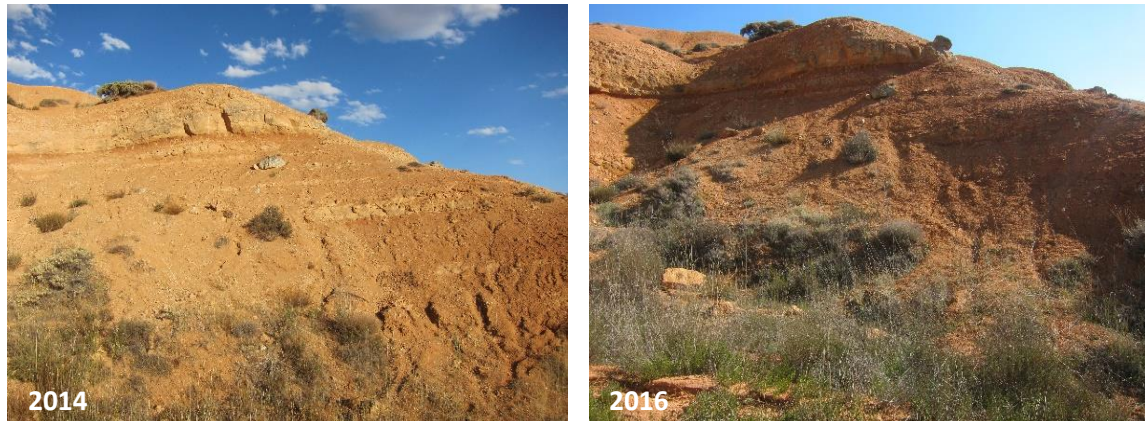


Figura 4.19. Comparación de escarpes desde el 27 de agosto de 2014 hasta el 6 de febrero de 2016, detalle de la disminución de los procesos erosivos producidos a lo largo del tiempo.

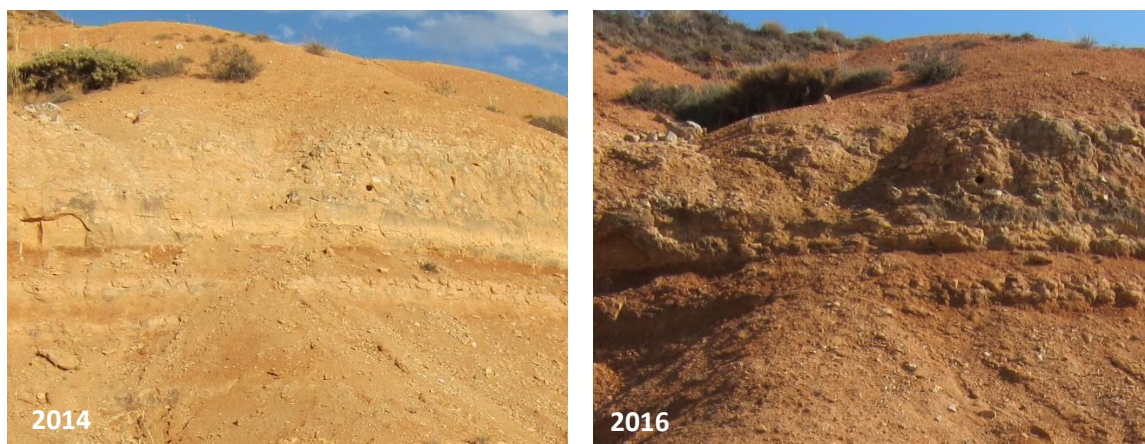


Figura 4.20. Comparación de escarpes desde el 27 de agosto de 2014 hasta el 6 de febrero de 2016, detalle del proceso erosivo en las zonas más competentes y su posterior proceso de sedimentación a lo largo de la pendiente.

4.4 PRODUCTOS CARTOGRÁFICOS DERIVADOS

Como se comentó en el apartado 3.2, *ContextCapture* permite generar una gran variedad de productos cartográficos derivados que dependiendo de las necesidades del usuario podrán ser aplicados sobre diferentes programas secundarios. A continuación, se exponen los productos cartográficos más significativos obtenidos mediante *ContextCapture*. En este apartado no se incluirán los Modelos de Superficie (DSM) por haberse tratado en los apartados anteriores.

- OBJETOS O MALLAS 3D

Los objetos o mallas 3D son los primeros que se deben realizar en *ContextCapture* puesto que son necesarios para poder obtener el resto de productos derivados.

Presentan diferentes extensiones, entre ellas podemos destacar los ficheros *.3MX con formato propio de Bentley y los ficheros *.OBJ que pueden ser abiertos con la mayoría de los

CAD o softwares 3D. Ambos ficheros se componen de mallas poligonales formadas por un conjunto de vértices, bordes y caras. La malla poligonal es recubierta de una textura con los colores originales generando así modelos 3D del talud.

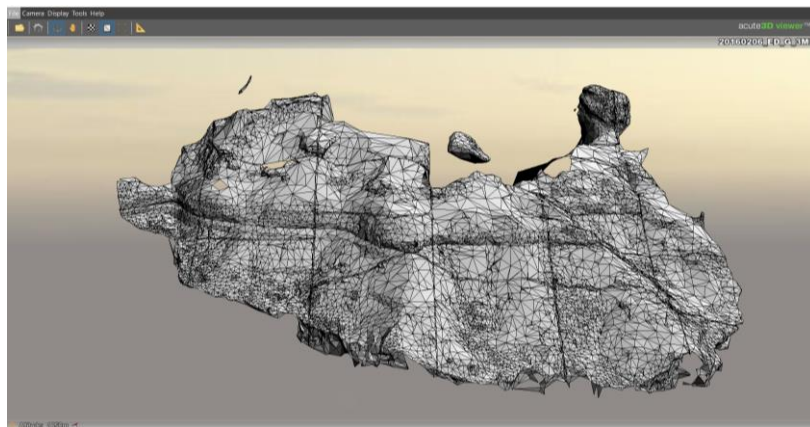


Figura 4.21. Visualización de la malla obtenida con ContextCapture para el talud de estudio con fecha 6 de febrero de 2016, en Acute3D Viewer.

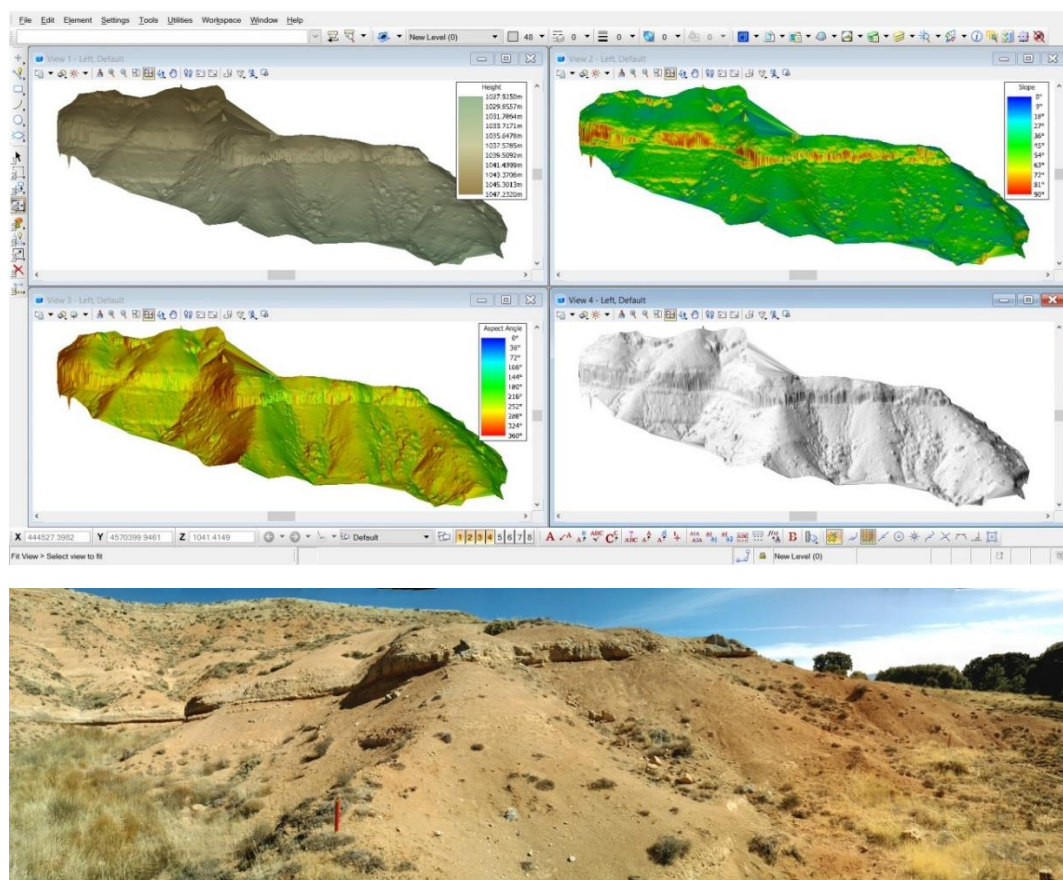


Figura 4.22. Vista isométrica de la estructura “mesh” o malla generada con el CAD MicroStation, que muestra en cuatro vistas la elevación, la pendiente, la orientación y el sombreado del escarpe y comparación con una panorámica fotográfica, tomada el 8 de octubre de 2016.

Y la extensión de ficheros *KML que es un formato de archivos jerárquico adecuado para la visualización 3D en tiempo real de conjuntos de datos en Google Earth.

Los ficheros obtenidos con esta extensión no se visualizan correctamente en Google Earth, aparecen suspendidos con respecto a su posición original. Esto puede ser debido a errores en la georreferenciación del modelo o a que la herramienta que genera estos archivos aún no está perfeccionada. Sería necesario dedicar más tiempo para conseguir una visualización correcta.

- NUBES DE PUNTOS (POINT CLOUDS), CON FORMATOS *LAS, *POD

Los ficheros con extensión *las y *pod son productos de nubes de puntos 3D que se pueden visualizar y procesar con otros softwares. El formato *las es de carácter público para el intercambio de datos en 3 dimensiones (3D) de nubes de puntos, sin embargo, el formato *pod únicamente se puede utilizar con los programas diseñados por Bentley (*Bentley Pointools* y *MicroStation*).



Figura 4.23. Nube de puntos obtenida con ContextCapture para el talud de estudio con fecha 6 de febrero de 2016.

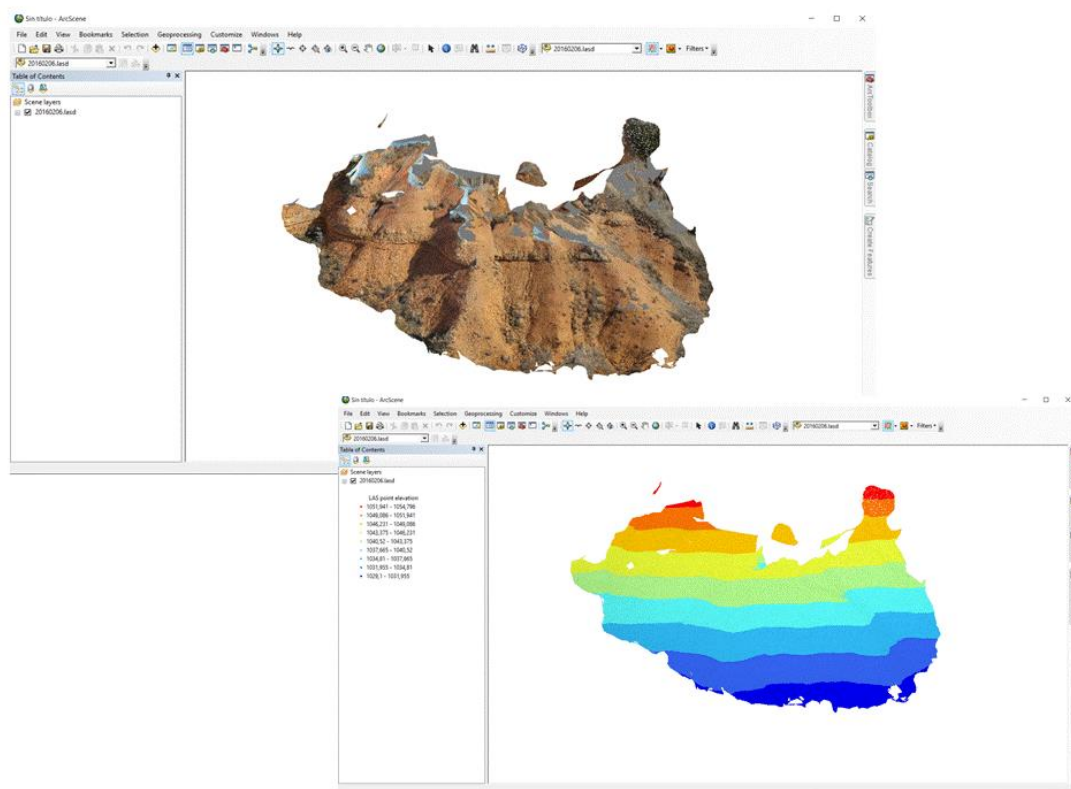


Figura 4.24. Visualización de las nubes de puntos obtenida con ContextCapture para el talud de estudio con fecha 6 de febrero de 2016 mediante ArcScene.

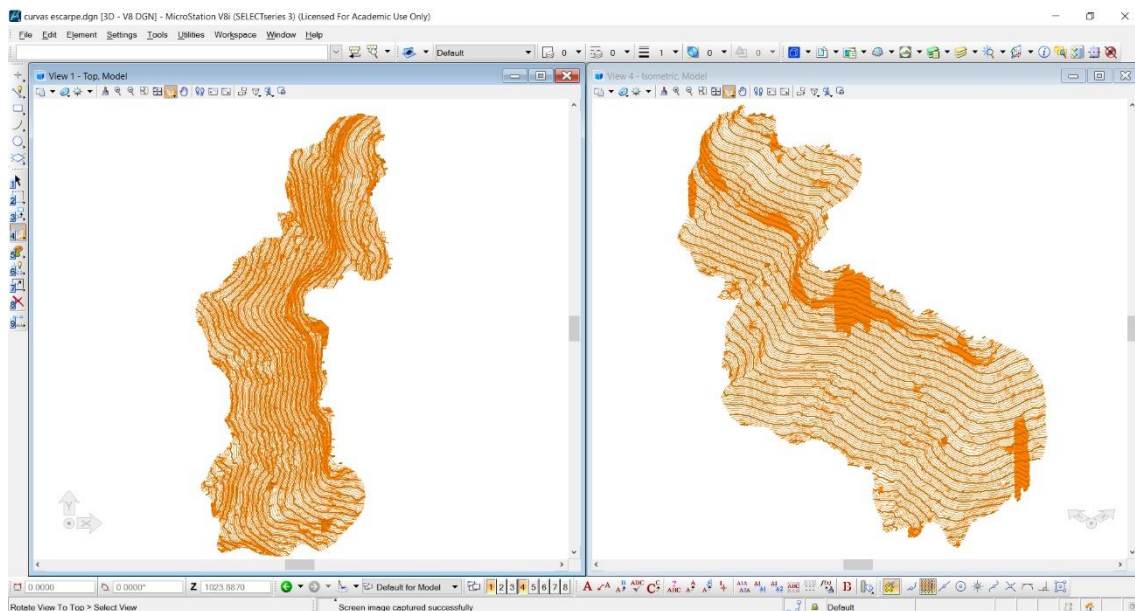


Figura 4.25. Visualización de las curvas de nivel en MicroStation, obtenidas a partir del modelo digital de superficies, con una equidistancia de 10 cm.



Las nubes de puntos 3D que se obtienen como resultado aparecen georreferenciadas y con sus colores originales. La cantidad de puntos que contiene cada una de ellas se muestra en la tabla que aparece a continuación y depende del número de fotografías utilizado y de los puntos de control tomados durante el proceso de georreferenciación (Tabla VII).

Tabla VII. Cantidad de puntos que componen las Nubes de Puntos generadas por ContextCapture

Nube de Puntos 06/02/2016	174.383.703 puntos
Nube de Puntos 19/ 09/2015	183.908.224 puntos
Nube de Puntos 27/08/2014	124.781.172 puntos

Si establecemos una comparación de estos ficheros de nubes de puntos 3D con los ficheros LIDAR proporcionados por el Instituto Geográfico Nacional, encontramos una clara diferencia con respecto al método de toma de fotografiado.

Los ficheros LIDAR producidos por el IGN se obtienen a partir de la toma de datos del terreno mediante un escáner aerotransportado. Generalmente presentan una extensión de 2 x 2 km y sus nubes de puntos son clasificadas de forma automática y coloreadas en RGB, tal como se muestran en las ortofotos del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA).

Los ficheros *LAS presentes en este TFM se obtuvieron a partir de técnicas de FR3D, técnica que determina las propiedades geométricas a partir de imágenes fotográficas. Como se ha visto en los apartados anteriores, el procedimiento de ajuste se realiza automáticamente a partir de un conjunto de múltiples imágenes superpuestas, las nubes de puntos presentan una extensión variable en función del área fotografiado, aparecen coloreadas en RGB original de las fotografías, pero no aparecen clasificadas.

5 DISCUSIÓN

A lo largo de este trabajo se ha mostrado la técnica de Foto-Reconstrucción 3D o combinación de procesos *Structure from Motion* (SfM) y *Multi-View Stereo* (MVS). Mediante esta técnica se han obtenido Modelos Digitales de Superficie (DSM) para tres periodos de tiempo diferentes con una elevada resolución y precisión geométrica.

Los Modelos Digitales de Superficie obtenidos presentan una resolución de 6 mm. Esta mínima resolución sólo se podría haber obtenido a partir de técnicas LIDAR. Un método mucho más caro, pero con resultados muy fiables. La comparativa de ambos métodos ha permitido calibrar la validez de los modelos obtenidos mediante la técnica de Foto-Reconstrucción 3D (Castillo et al., 2012; Gómez-Gutiérrez et al., 2014). Por otro lado, el empleo de técnicas LIDAR no hubiera podido diferenciar las zonas de erosión diferencial con morfología extraplomada situadas entre los materiales más competentes y los menos competentes.

En este estudio uno de los problemas observados se corresponde con los errores cometidos durante el proceso de georreferenciación. El error RPR (ratio de precisión relativa) se relaciona con la distancia de toma de fotografías, en nuestro trabajo estas distancias son pequeñas, del orden de 3 m estando en conformidad con las propuestas establecidas en los trabajos de (James y Robson, 2012; Smith y Vericat, 2015). Estos autores también establecen que el error RMSE aumenta con la distancia originándose modelos 3D de mayor calidad para distancias más cortas de fotografiado.

En los modelos obtenidos es posible minimizar el error incluyendo dos nuevos puntos de control que nos permitan una georreferenciación de las partes altas del talud, desapareciendo así los errores ocasionados en esas zonas.

Por otro lado, en los productos cartográficos obtenidos se observan zonas con sombras en los que es difícil la visualización, estas zonas de sombras pueden ser solucionadas a partir de la toma de fotografías durante las horas de menos incidencia solar y con menor presencia de sombras.

El estudio realizado cumple con los objetivos prefijados, situándose dentro del umbral de tolerancia aceptable para poder tomar los resultados como válidos. La técnica de Foto-Reconstrucción-3D proporciona Modelos Digitales de Superficie con una alta resolución lo que permite poder monitorizar cambios en la superficie a un alto nivel de detalle (cm o incluso mm). Sin embargo, para que la técnica sea robusta es fundamental que los Modelos Digitales de Superficie queden correctamente superpuestos, ya que a ese nivel de detalle, errores de superposición en el modelo tendrían como consecuencia una mala detección de los cambios de nivel de superficie. Estudios como los de Gómez-Gutiérrez et al., 2014 y Tanarro & Gómez, 2014 demuestran que la FR-3D es una técnica válida para monitorizar los fenómenos geomorfológicos.

En relación con los resultados obtenidos con respecto a los procesos geomorfológicos de erosión/sedimentación podemos destacar la alta tasa de erosión obtenida para el intervalo de tiempo que va desde el 19 de septiembre de 2015 hasta el 6 de febrero de 2016 cuyo valor es de $1,44 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ a}^{-1}$. Estos valores son aceptables si tenemos en cuenta que se trata de un talud natural, sin protección vegetal y sobre material fácilmente erosionable. Estudios realizados en



zonas próximas (Tanarro & Gómez, 2014) reflejan resultados menores para periodos de tiempo de longitud aproximada.

En el Modelo de Diferencias obtenido para este periodo de tiempo, los procesos de erosión/sedimentación se distribuyen de forma sistemática a favor de bandas, esto hace pensar en un periodo de lluvias anterior a la toma de las fotografías que originaría estos surcos o regueros coincidentes con las zonas de erosión del agua y la acumulación de sedimento en las zonas próximas de pendiente más favorable.



6 CONCLUSIONES

Este Trabajo de Fin de Máster ha presentado el potencial de la técnica de Foto-Reconstrucción 3D (FR-3D) para análisis geomorfológicos a través de la monitorización de un escarpe situado en la ladera de la margen derecha del río Duratón en el sector oriental de la provincia de Segovia.

La técnica de FR-3D fue empleada sobre fotografías tomadas con cámara convencional en tres periodos de tiempo diferentes obteniéndose diferentes productos cartográficos con el programa *Bentley ContextCapture* (Modelos Digitales de Superficie, Nubes de Puntos, Mallas 3D y ficheros KML para introducir en *Google Earth*).

Los Modelos Digitales de Superficie obtenidos presentan una resolución milimétrica y a partir de ellos se ha realizado la monitorización de los procesos geomorfológicos para las diferentes fechas de estudio que ocurren en el escarpe. Tras realizar la resta del Modelo Digital de Superficie (DSM) más moderno con fecha 6 de febrero de 2016 con los otros dos DSMs de 19 de septiembre de 2015 y 27 de agosto de 2014 se obtuvieron dos nuevos modelos, denominados Modelos de Diferencias de Elevaciones (DoD).

En el DoD obtenido para el periodo de tiempo que va desde el 19 de septiembre de 2015 hasta el 6 de febrero de 2016, la tasa de erosión es de $1,44 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ para un intervalo de tiempo de 142 días existiendo un predominio de la actividad de tipo erosiva frente a los procesos de sedimentación. En general el proceso de erosión aparece representado en gran parte del talud, coincidiendo con la presencia de surcos o regueros que se han ido haciendo cada vez más profundos por la escorrentía del agua a través de ellos sobre materiales fácilmente erosionables.

En el DoD obtenido para el periodo de tiempo que oscila entre el 27 de agosto de 2014 y el 6 de febrero de 2016, la tasa de erosión es de $0,057 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ par aun intervalo de tiempo de 496 días, destacando en cambio un predominio de los procesos de sedimentación frente a los de erosión. Los procesos de sedimentación aparecen representados en la mayor parte del talud relacionados generalmente con la acumulación de sedimentos por colmatación de regueros o con la caída de fragmentos o escamas provenientes de la erosión del escarpe.

Podemos concluir que la técnica de Foto-Reconstrucción 3D es apta para la obtención de Nubes de Puntos y Mallas georreferenciadas para ser procesadas con otros programas secundarios.



7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Boufama, B., Mohr, R., & Veillon, F. (1993, May). Euclidean constraints for uncalibrated reconstruction. In *Computer Vision, 1993. Proceedings., Fourth International Conference on* (pp. 466-470). IEEE
- Cadavid, S., Corral, A., & Portero, J. M. (1971). Investigación estructural y geofísica en la región de Sepúlveda (Segovia). *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural. Sección Geológica*, (69), 145-173.
- Castillo, C.; Pérez, R.; James, M.R.; Quinton, J.N.; Tanguas, E.V. y Gómez, J.A. 2012. Comparing the accuracy of several field methods for measuring gully erosion. *Soil Science Society of America Journal*, 76, 1319-1332.
- Eltner, A. y Schneider, D. (2015): "Analysis of Different Methods for 3D Reconstruction of Natural Surfaces from Parallel-Axes UAV Images". *The Photogrammetric Record*, 30, 279-299.
- Eltner, A., Kaiser, A., Castillo, C., Rock, G., Neugirg, F. y Abellan, A. (2015): "Image-based surface reconstruction in geomorphometry – merits, limits and developments of a promising tool for geoscientists". *Earth Surf. Dynam. Discuss.*, 3, 1445-1508.
- Fernández, P. y Garzón, G. (1994). Ajustes en la red de drenaje y morfoestructura en los ríos del Centro-Sur de la cuenca del río Duero. In *Geomorfología en España: III Reunión de geomorfología, Logroño 14 a 16 de septiembre de 1994* (pp. 471-484). Sociedad Española de Geomorfología.
- Fonstad, M.A., Dietrich, J.T., Courville, B.C., Jensen, J.L., Carbonneau, P.E., (2013): "Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement", *Earth Surface Processes and Landforms*, 38, 421-430.
- Förstner, W. (1986). A feature based correspondence algorithm for image matching. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 26(3), 150-166.
- Gómez-Gutiérrez, Á., Schnabel, S., Conoscenti, C., Caraballo-Arias, N.A., Ferro, V., de Sanjosé, J.J., Berenguer-Sempere, F. and J. de Matías, (2014a). "Application of 3D photo-reconstruction techniques in Geomorphology: examples through different landforms and scales". *Geophysical Research Abstracts*, 16, EGU2014-11528. EGU General Assembly 2015.
- Gómez-Gutiérrez; Schnabel, S.; Berenguer-Sempere, F. y Lavado-Contador, F. (2014b): "Using novelty 3D photo-reconstruction methods to estimate gully headcut erosion", *Catena*, 120: 91-101.
- Gómez-Gutiérrez, A., Schnabel, S.; Conoscenti, C.; Caraballo-Arias, N.A., Ferro, V., Di Stefano, C., Sanjosé, J.J., de Matías, J. y Berenguer-Sempere, F. (2014): "Utilización de técnicas de foto-reconstrucción 3D automatizada en geomorfología: ejemplos para diferentes morfologías y escalas", en Schnabel, S. y Gómez-Gutiérrez, A. (Ed.): *Avances de la Geomorfología en España 2012-2014*, XIII Reunión Nacional de Geomorfología, Cáceres, 2014, 295-298 pp.
- Gómez-Gutiérrez, A., Sanjosé-Blasco, J.J., de Matías-Bejarano, J. y Berenguer-Sempere, F. (2014): "Comparing two photo-reconstruction methods to produce high density point clouds and DEMs in the Corral del Veleto Rock Glacier (Sierra Nevada, Spain)". *Remote Sens.*, 6: 5407-5427.
- Harris, C., & Stephens, M. (1988, August). A combined corner and edge detector. In *Alvey vision conference* (Vol. 15, p. 50).



- James, M.R. y Robson, S. (2012) "Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application", *Journal of Geophysical Research*, 117: F03017.
- James, M. R., y Varley, N. (2012): "Identification of structural controls in an active lava dome with high resolution DEMs: Volcán de Colima, Mexico", *Geophys. Res. Lett.*, 39, L22303, doi:10.1029/2012GL054245.
- James, M.R., Ilic, S. y Ruzic, I. (2013): "Measuring 3D coastal change with a digital camera", *Proceedings of Coastal Dynamics*, Bordeaux, 893-904.
- James, L.A.; Hodgson, M.E.; Ghoshal, S. y Megison, M. (2012): "Geomorphic change detection using historic maps and DEM differencing: The temporal dimension of geospatial analysis", *Geomorphology*, 137: 181–198.
- López Olmedo, F.; Díaz de Neira, A.; Hernaiz Huerta, P.P.; Cabra Gil, P.; Solé Pont, J.; Diaz Arranz, R.: Mapa Geológico de España 1:50.000. Hoja nº 431 (Sepulveda). IGME, Madrid
- Lowe, D. G. (1999). Object recognition from local scale-invariant features. In *Computer vision, 1999. The proceedings of the seventh IEEE international conference on* (Vol. 2, pp. 1150-1157). IEEE.
- Makadia, A., Geyer, C., & Daniilidis, K. (2007). Correspondence-free structure from motion. *International Journal of Computer Vision*, 75(3), 311-327.
- Muñoz Jiménez, J., & Tanarro García, L. M. (2000). El modelado fluvial en el piedemonte norte del Guadarrama oriental y Somosierra (Sistema Central Español): los valles disimétricos de la alta cuenca del Duratón. *VI Reunión Nacional de Geomorfología. Sociedad Española de Geomorfología Departamento de Geodinamica (UCM)*.
- Seitz, S. M., Curless, B., Diebel, J., Scharstein, D., & Szeliski, R. (2006, June). A comparison and evaluation of multi-view stereo reconstruction algorithms. In *2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'06)* (Vol. 1, pp. 519-528). IEEE.
- Smith, M.V.; Carrivick, J.L. y Quincey, D.J. (2015): "Structure from motion photogrammetry in physical geography", *Progress in Physical Geography*, 26: 1-29.
- Snavely, N. (2010). Bundler: Structure from motion (SFM) for unordered image collections. *Available online: phototour.cs.washington.edu/bundler/(accessed on 12 July 2013)*.
- Spetsakis, M., & Aloimonos, J. Y. (1991). A multi-frame approach to visual motion perception. *International Journal of Computer Vision*, 6(3), 245-255.
- Szeliski, R., & Kang, S. B. (1995, June). Direct methods for visual scene reconstruction. In *Representation of Visual Scenes, 1995.(In Conjunction with ICCV'95), Proceedings IEEE Workshop on* (pp. 26-33). IEEE.
- Tanarro, L. M. (2006). Geomorfología de los valles del piedemonte Norte del Sistema Central en su sector segoviano: cuenca del río Duratón. PhD. Facultad de Geografía e Historia. Universidad Complutense de Madrid.
http://cisne.sim.ucm.es/search*spi~S7/X?SEARCH=tanarro&searchscope=7&SORT=D
- Tanarro García, L. M. (1994): "Morfolología de cárcavas sobre el mioceno comprendido entre el piedemonte gneísico-calcáreo de Pedraza-Prádena y el macizo calcáreo de Sepúlveda (Segovia)". En: Arnaéz, J., García Ruiz, J. M. y Gómez Villar, A. (Ed.). *IIIª Reunión Nacional de Geomorfología*. Logroño, 105-115 pp.
- Tanarro García, L.M. y Gómez Gutiérrez, A. (en revisión): "El empleo de la técnica de fotoreconstrucción 3d para obtener nubes de puntos y productos cartográficos derivados". *GeoFocus*.



- Tanarro García, L.M. y Gómez Gutiérrez, A. (2014): "La aplicación de técnicas de foto-reconstrucción 3D al estudio de la dinámica erosiva en las laderas acarcavadas de valle del Caslilla (Segovia) y de una cárcava permanente en Monroy (Cáceres)", en Schnabel, S. y Gómez Gutiérrez, A. (Ed.). *Avances de la Geomorfología en España 2012-2014*, XIII Reunión Nacional de Geomorfología, Cáceres, 2014, pp: 347-350.
- Westoby, M.J.; Brasington, J.; Glasser, N.F.; Hambrey, M.J. y Reynolds, J.M. 2012. *Structurefrom-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications*. *Geomorphology*, 179: 300–314.
- Wheaton, J. M, Brasington, J.; Darby, S. E. y Sear, D. A. (2010). Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: improved sediment budgets, *Earth Surf. Process. Landforms* 35, 136–156.